



UNIVERSIDADE  
DE VIGO

# MOTORES ASÍNCRONOS

## Regulación de velocidad Introducción

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

## Variación de velocidad. Introducción

Una buena parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, en los cuales se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes

Los accionamientos a velocidad variable permiten optimizar los procesos industriales reduciendo el gasto de energía y de materias consumidas.

Se encuentran en constante crecimiento y su evolución es muy rápida.

CUANTITATIVO

Por el número y la potencia unitaria de los equipos

CUALITATIVO

Por la precisión, la flexibilidad y la fiabilidad de dichos equipos

En los países industrializados, los motores eléctricos ocupan la primera posición en el uso de la energía eléctrica.

- ✚ Tracción ferroviaria
- ✚ Trenes de laminación
- ✚ Pequeños motores del sector terciario y residencial



## Variación de velocidad. Introducción

### **Motores que requieren regulación de velocidad:**

**Motores de tracción, máquinas herramientas, extrusoras de plásticos, trenes de laminación, mecanismos de elevación, transportadores y elevadores de materiales, equipos de aire acondicionado, bombas, ventiladores, hornos rotativos o lineales, embotelladoras, norias frigoríficas, molinos, agitadores, etc.**

- La variación de la velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, cajas de cambio, etc, o mediante métodos eléctricos o electrónicos.
- Los métodos mecánicos han quedado obsoletos por su elevado costo, volumen y peso, alto mantenimiento y desgastes, etc. Por ese motivo, nos concentraremos en los métodos electricos o electrónicos.

## Principales factores a considerar para el diseño de RV

- a) Límites o gama de regulación.
- b) Progresividad o flexibilidad de regulación. Aceleración, desaceleración, estabilidad, etc.
- c) Rentabilidad económica considerando el ahorro de energía.
- d) Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
- e) Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
- f) Carga admisible a las diferentes velocidades.
- g) Potencia o par necesarios, basados en la producción deseada.
- h) Tipo de carga (par constante, potencia constante, etc).
- i) Condiciones de arranque y frenado

El estudio detallado para cada caso particular tiene una gran importancia práctica, ya que la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar para un servicio determinado, requieren el conocimiento de las particularidades de éste proceso.



## Variación de velocidad. Introducción

- En principio se puede decir que la regulación a voluntad de la velocidad de los motores eléctricos es un régimen transitorio en el que se modifica la velocidad angular del conjunto motor-máquina accionada como consecuencia de una acción de mando determinada. Dicho conjunto es inercial y disipativo, incluyendo en este último concepto a las cargas útiles, pues consumen energía.



## Variación de velocidad. Introducción

■ Recordemos que el comportamiento dinámico del conjunto motor-maquina accionada está regido por la siguiente ecuación diferencial:

$$T_m - T_r = J \cdot d\omega / dt$$

Donde **T<sub>m</sub>** es el par motor, **T<sub>r</sub>** el par resistente, **J** es el momento de inercia del conjunto motor-maquina accionada y **ω** es la velocidad angular de dicho conjunto.

Por lo tanto, para que el conjunto modifique su velocidad angular se necesita variar el par motor para que sea distinto del par resistente, de manera de generar una aceleración angular. El proceso finaliza cuando se equilibra el par motor con el par resistente, estabilizándose la velocidad de giro del motor.



## Variación de velocidad. Introducción

■ La variación del par motor generalmente está asociada a una variación de flujo y/o de la corriente absorbida, la cual no debe superar determinado límite por el calentamiento de los conductores involucrados.

En este estudio no deben dejarse de lado otros aspectos que también resultan importantes, como por ejemplo el consumo de energía disipada en forma de calor y las perturbaciones sobre la red de baja tensión.

Estas perturbaciones incluyen principalmente a los transitorios de conmutación, la generación de armónicos y las caídas de tensión (muy notables en los elementos de iluminación), que pueden afectar el funcionamiento de otros elementos conectados a la red, lo que resulta crítico en las instalaciones con muchos motores que realizan frecuentes cambios de velocidad.

Para finalizar esta introducción digamos que los dispositivos de variación de velocidad pueden ser de operación manual (regulación manual) o por un dispositivo automático especial (regulación automática).

## Características de la fuerza motriz de origen eléctrico

La mayor supremacía de la energía eléctrica en la producción de fuerza motriz se deriva de la capacidad de las redes eléctricas para hacer circular, simultáneamente y por el mismo canal, energía e información

### Características de la fuerza motriz de origen eléctrico

- *La flexibilidad de su uso*
- *La precisión para ejecutar consignas (de par, aceleración, velocidad o posición)*
- *Sus prestaciones energéticas*
- *El elevado índice de disponibilidad*
- *El coste de mantenimiento reducido y programable*
- *Su capacidad de adaptación a la evolución de los procesos industriales, lo que constituye una ventaja importante si la industria pretende reducir su contaminación ambiental (ruidos, contaminación del aire, del agua,...).*

*“Las aplicaciones de los motores eléctricos en elevadores, locomotoras, impresoras, grúas, bombas, ventiladores, compresores de aire, vehículos eléctricos, entre otras muchas que resulta difícil enumerar en detalle, conllevan a la necesidad de que el comportamiento del motor eléctrico bajo un control perfecto y económico a cualquier velocidad resulte deseable, en algunas ocasiones imprescindible, desde paro a plena carga” (\*)*

(\*) Harry Ward Leonard



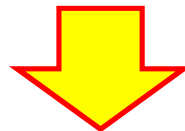
# Motores asíncronos. Regulación de velocidad

## INTRODUCCIÓN. Regulación de motores en la EU

Se estima que durante 2.010 fueron construidos en la Unión Europea más de 250 millones de motores de todas las potencias y para todo tipo de aplicaciones.

El uso de motores eficientes acompañados de un regulador electrónico supondría un ahorro en la Unión Europea de 135 billones de kWh. Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación eléctrica se reducirían en 69 millones de toneladas anuales.

**CON TODO ELLO:**



**Se calcula que en la actualidad, menos de un 2,5% de los motores nuevos con potencia inferior a 750 W incorporan un control electrónico. Para potencias superiores a 7,5 kW, el porcentaje de controles electrónicos incorporados es del 9,5%.**

## Características de la fuerza motriz de origen eléctrico

**Reparto para un año determinado, de la producción francesa de motores trifásicos de alterna.**

**(Estimación realizada por GIMELEC)**

Potencia (kW)	% de motores (~)	% de potencia (~)
P<0,75	40	3
0,75<P<7,5	55	35
7,5<P<75	4	20
75<P<750	0,5	18
750<P	0,05	24

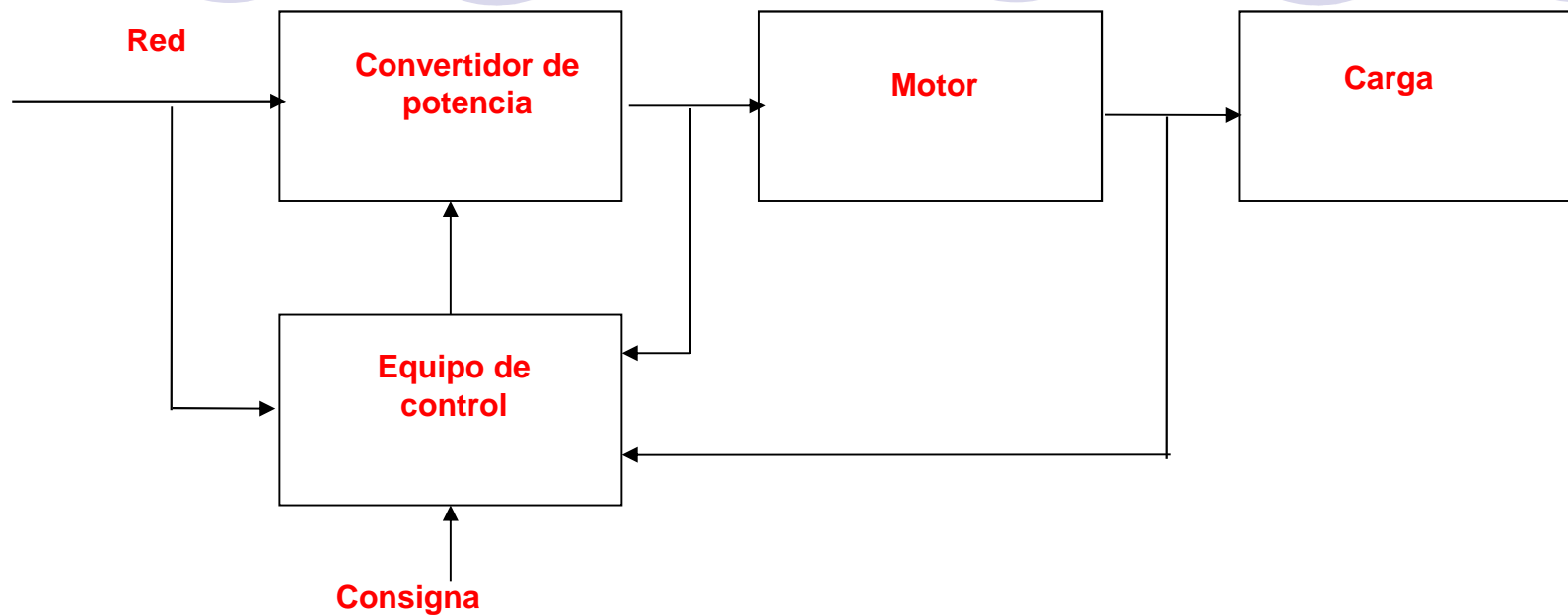
En el sector industrial, se estima que los motores de menos 4 kW representan el 80% del total, si bien solo representan un 10% del consumo.

TIPO	P ≤ 750W	0,75 kW < P < 375 kW
Corriente Alterna Monofásica	67.019.000	6.379.000
Corriente Alterna Trifásica	11.700.000	10.175.000

**Producción de motores eléctricos de ca de tamaño pequeño y medio en el año 2.010 en la unión europea**

La variación de velocidad permite explotar adecuadamente las posibilidades que ofrecen los motores eléctricos, como el rendimiento y el ahorro energético, solo un porcentaje reducido (≈20%), si bien creciente, de los ME están equipados con variadores electrónicos.

## Estructura general de los accionamientos eléctricos a velocidad variable

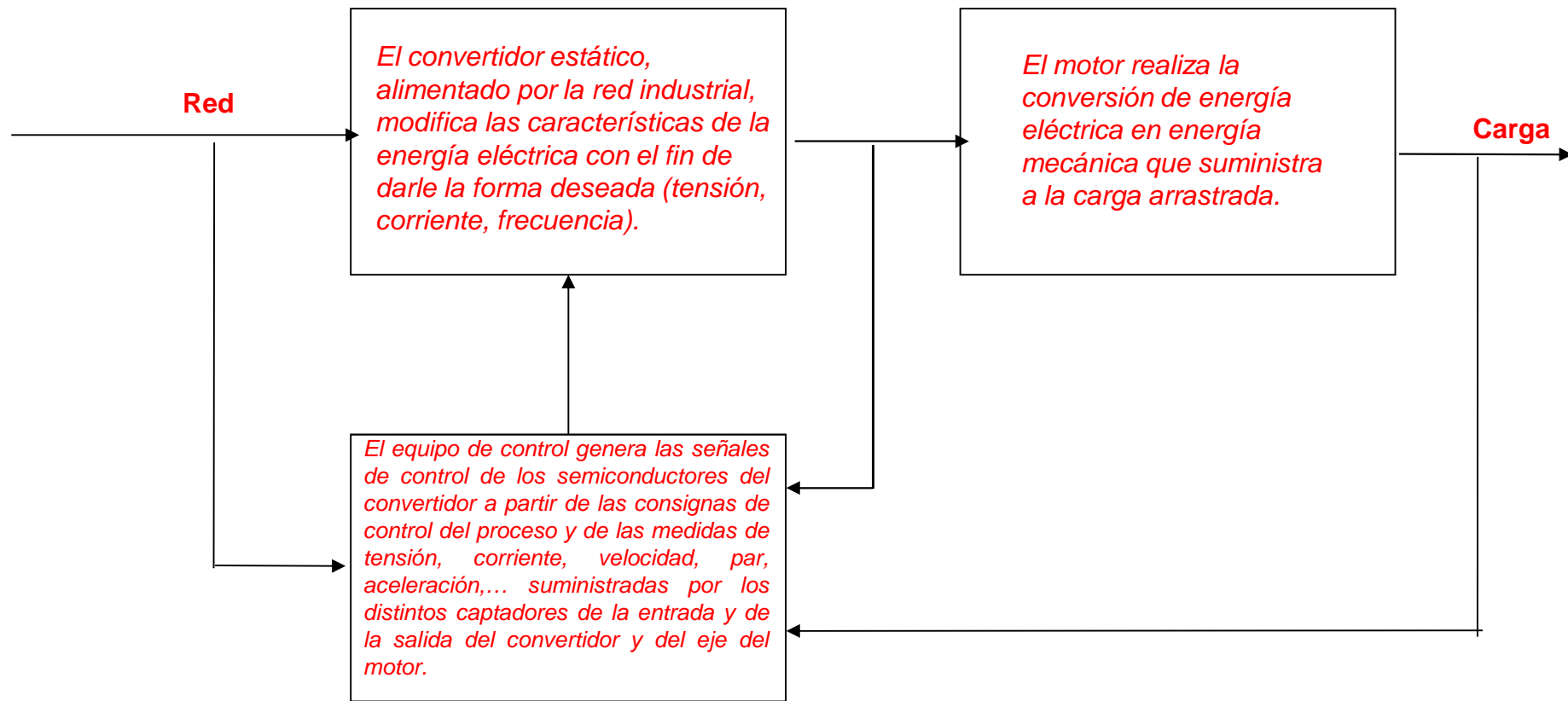


**Diagrama de bloques de un accionamiento a velocidad variable.**

Por lo general, un accionamiento eléctrico a velocidad variable, consta de los siguientes elementos:

- *Un convertidor electrónico de potencia*
- *Un motor eléctrico*
- *La carga mecánica arrastrada*
- *Un equipo de control.*

# Estructura general de los accionamientos eléctricos a velocidad variable



**Consigna**

Los avances en el campo de la microinformática han desempeñado una importante función en el desarrollo de los variadores de velocidad al permitir mejorar las prestaciones y reducir el número de captadores necesarios

# Campos de aplicación de los accionamientos eléctricos a velocidad variable

Prácticamente todas las ramas de la industria que utilizan la fuerza motriz, son susceptibles de utilizar accionamientos eléctricos a velocidad variable.

1º Grupo: Aplicaciones en las que la velocidad variable aparece desde el principio como condición intrínseca de funcionamiento del proceso.

## Aplicaciones

- *La tracción eléctrica*
- *Los accionamientos de las máquinas laminadoras y de sus componentes auxiliares*
- *Los accionamiento de las máquinas de extrusión*
- *Los accionamientos de los hornos de cemento*

## Sectores

- *Industria metalúrgica, textil, del caucho*
- *Las máquinas herramientas*
- *La robótica*
- *La manutención....*

## Campos de aplicación de los accionamientos eléctricos a velocidad variable

Prácticamente todas las ramas de la industria que utilizan la fuerza motriz, son susceptibles de utilizar accionamientos eléctricos a velocidad variable.

2º Grupo: Formado, casi íntegramente, por los accionamientos de las turbomáquinas receptoras:

- ▶ Bombas
- ▶ Ventiladores
- ▶ Inyectores de aire
- ▶ Compresores

Este campo representa las 2/3 partes del consumo de energía eléctrica de los motores del sector industrial

Una vez estudiada la característica par-velocidad, las turbomáquinas constituyen uno de los grupos de carga mecánica cuya variación de velocidad de accionamiento mediante motor eléctrico es más fácil de realizar. Prácticamente en todos los casos se puede utilizar el motor asíncrono

## Campos de aplicación de los accionamientos eléctricos a velocidad variable

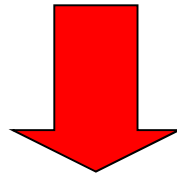
Los requerimientos que, generalmente, se precisa que cumplan los accionamientos de velocidad variable, son los siguientes:

- ▶ *Con la finalidad de que el proceso productivo resulte más económico y con un menor consumo de energía, se precisa una adaptación óptima de la velocidad a las necesidades específicas de las máquinas accionadas.*
- ▶ *Las velocidades prefijadas han de mantenerse constantes aún a pesar de las variaciones que puedan producirse en la carga y en la tensión de red.*
- ▶ *En muchas aplicaciones, se precisa acelerar, frenar y posicionar exactamente las masas. Se ha de valorar convenientemente la recuperación de energía en el frenado.*
- ▶ *Cuando en un proceso productivo existan varios motores trabajando coordinadamente, se ha de procurar que el sincronismo entre los mismos sea el apropiado.*
- ▶ *En condiciones ambientales especialmente difíciles, se precisa un nivel de protección elevado.*
- ▶ *Generalmente se busca siempre que el manejo sea sencillo, que sean sistemas altamente fiables y que el mantenimiento sea reducido.*



## Importancia de realizar un estudio particularizado

El estudio de la regulación de velocidad para cada caso particular tiene una importancia práctica elevada, ya que la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar para un servicio determinado, requieren un conocimiento profundo de las particularidades del proceso a controlar.



En principio, se puede decir que a través de la regulación de la velocidad de los motores eléctricos, se trata de modificar la velocidad angular del conjunto motor-máquina accionada mediante una acción de mando determinada.





## Otras ventajas de la velocidad variable

### Ventajas en la alimentación eléctrica:

- Menor sobreintensidad de arranque
- Posibilidad de conseguir un ahorro de energía
- Optimización del factor de potencia

### Ventajas en el motor:

- Menor esfuerzo mecánico
- Menor calentamiento

### Ventajas en el sistema:

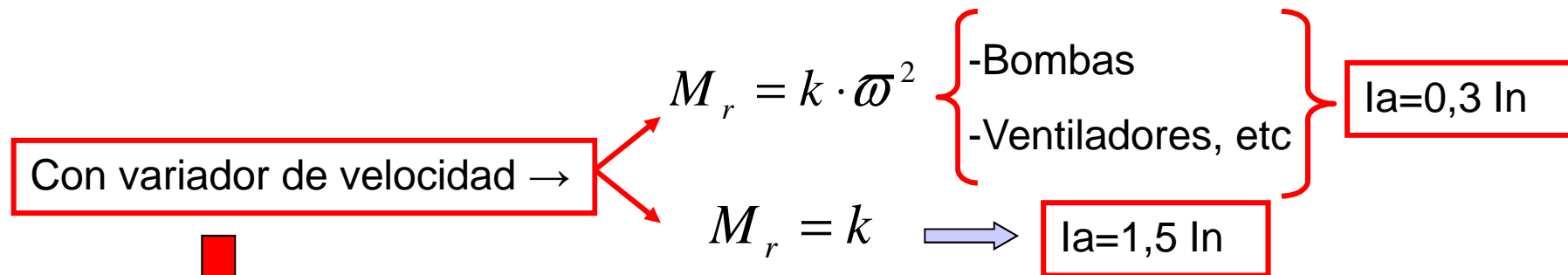
- Conseguir un control continuo y a distancia
- Obtener una mayor flexibilidad en la configuración
- Obtener un adecuado reglaje según la aplicación

## Otras ventajas de la velocidad variable

### Ventajas en la alimentación eléctrica:

- Menor sobreintensidad de arranque

Si se realiza el arranque directo de un MI  $\rightarrow I_a = 4 \div 6 I_n$



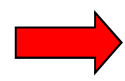
- Posibilidad de conseguir ahorro de energía
- Optimización de factor de potencia

La reducción de la potencia necesaria en el sistema de alimentación que, en el caso de arranque directo de los motores, debe determinarse para tener en cuenta los requerimientos de corriente y las caídas de tensión que provocan, así como el ahorro energético que ya se ha comentado y que es inherente a algunas aplicaciones y, también, la posibilidad de optimizar el factor de potencia de la instalación.

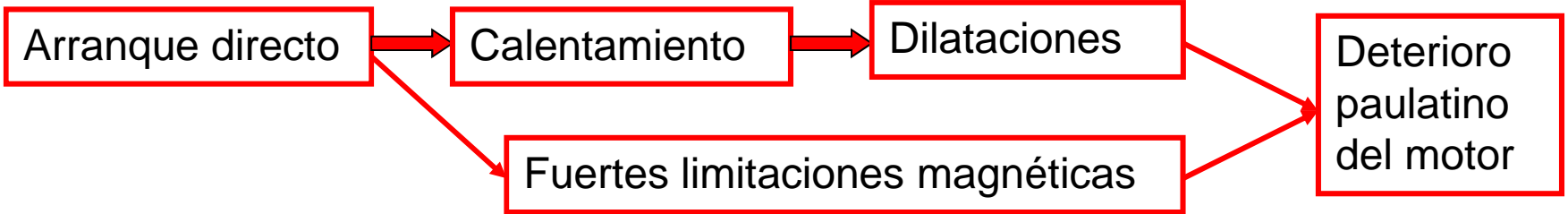
## Otras ventajas de la velocidad variable

Ventajas en el motor:

- Menor esfuerzo mecánico
- Menor calentamiento



Aumento de la duración de vida



Los accionamientos eléctricos a velocidad variable tienen la ventaja de permitir realizar los arranques con una corriente limitada y tiempos de aceleración controlados, lo cual hace que no existan limitaciones en la frecuencia de los arranques

En un motor que funcione a potencia reducida, los calentamientos también se reducen. En este punto, es preciso tener presente que se estima que: **la vida de un aislamiento se duplica cada vez que la temperatura disminuye unos 10 °C.**



## Otras ventajas de la velocidad variable

### Ventajas en la carga



Los arranques se realizan sin variaciones bruscas de par, a par o a aceleración constante. Por lo que, el ruido, las vibraciones del equipo accionado y las condiciones anormales que se tienen durante el arranque directo, desaparecen.

El interés que para la red, para el motor y para la carga, representa el arranque mediante un convertidor estático, justifica por si mismo la utilización de un convertidor, aunque en funcionamiento normal el motor pudiese funcionar conectado directamente a la red.

El control del par, que permite un equipo a velocidad variable, posibilita protegerse de determinados fallos en la red como, por ejemplo, los huecos de tensión. Con un equipo a velocidad variable, el par del motor se puede controlar tanto durante el hueco de tensión como durante el retorno de la misma al valor normal.

## Otras ventajas de la velocidad variable

Las principales ventajas residen, sobre todo, en la flexibilidad, la precisión y la rapidez de las regulaciones que permiten realizar los accionamientos a velocidad variable.



- ▶ Aumento de la productividad
- ▶ Menor cantidad de materias primas perdidas
- ▶ Aumento de las velocidades de realización
- ▶ Paso de un proceso discontinuo a un proceso continuo, etc.

Otras ventajas propias de cada campo de aplicación

Reducción del coste y del tiempo de reparación de averías

## Inconvenientes de los variadores de velocidad

Es necesario que el motor pueda funcionar adecuadamente con el convertidor, ya que la corriente que recibe no es perfectamente lisa si se trata de un motor de corriente continua, ni perfectamente sinusoidal si se trata de un motor de corriente alterna.

El convertidor toma de la red corrientes no sinusoidales y se comporta como un generador de corrientes armónicas.

El convertidor está constituido por semiconductores que cierran o abren los circuitos muy rápidamente y originan variaciones rápidas de corriente o de tensión. Por este motivo, las ondas electromagnéticas radiadas pueden alterar el entorno.

Los fabricantes de variadores de velocidad han de cumplir las normas de compatibilidad electromagnética, tanto para perturbaciones conducidas como radiadas, que les afecten

## Ventajas e inconvenientes de los semiconductores de potencia

### VENTAJAS

- *Mayor flexibilidad y mejores posibilidades de control.*
- *Posibilidad de obtener mejor estabilidad y rapidez de respuesta.*
- *El no tener partes mecánicas móviles redundaba en un menor mantenimiento y ausencia de vibraciones.*
- *Mayor fiabilidad de los equipos y una vida más larga.*
- *Al no producirse arco eléctrico permite el trabajo en ambientes explosivos.*

### INCONVENIENTES

- *En algunas aplicaciones, todavía resultan sistemas caros.*
- *Su capacidad para soportar sobretensiones y sobreintensidades es más reducida.*

La mayor flexibilidad y facilidad de control de los semiconductores de potencia, permiten solucionar problemas que por procedimientos electromecánicos sería difícil o imposible

La paulatina reducción de precio de estos sistemas y la aparición del microprocesador en 1971, permitió que el motor asíncrono sustituyese, en gran número de aplicaciones de velocidad variable, al más caro en inversión inicial y mantenimiento, motor de corriente continua.



## Ventajas e inconvenientes de los semiconductores de potencia

En el nuevo milenio, las comunidades científica e industrial se enfrentan a la difícil tarea de armonizar el desarrollo económico y la protección del medio ambiente, al objeto de asegurar el bienestar y la mejora de la calidad de vida de las generaciones futuras. El mercado de los reguladores de velocidad (*drives*) no es ajeno a estos cambios, y por ello responde, ahora más que nunca, no sólo a la necesidad de resolver aspectos primordiales de automatización sino que, apoyándose en nuevas tecnologías, contempla además la calidad de onda y el ahorro energético como respuesta a la utilización más racional y eficiente de los recursos naturales.





## Objetivos que se persiguen con la variación de velocidad

### Fijar la velocidad de funcionamiento

#### Arrancar y parar con suavidad obteniendo:

- ✓ Reducir la corriente de arranque
- ✓ Conseguir un menor golpe mecánico
- ✓ Lograr un adecuado posicionamiento

#### Conseguir diferentes velocidades:

- ✓ Para realizar una aproximación lenta
- ✓ Para obtener una adecuada velocidad de trabajo
- ✓ Para obtener una velocidad de retorno rápida

#### Mantener una velocidad constante:

- ✓ Cualesquiera que sea la carga
- ✓ Con fluctuaciones de la red

#### Ajustar un parámetro del proceso:

- ✓ Presión, caudal, etc...
- ✓ Bobinado, velocidad de corte lineal,...

#### Sincronizar velocidad, posición:

- ✚ Entre máquinas o partes.



## La variación de velocidad según las exigencias dinámicas y de precisión

### Dinámica.

Se precisa alta dinámica, si:

- Se necesitan tiempos cortos en arranque, paro e inversión
- Para cargas arrastrantes (elevación, alta inercia)

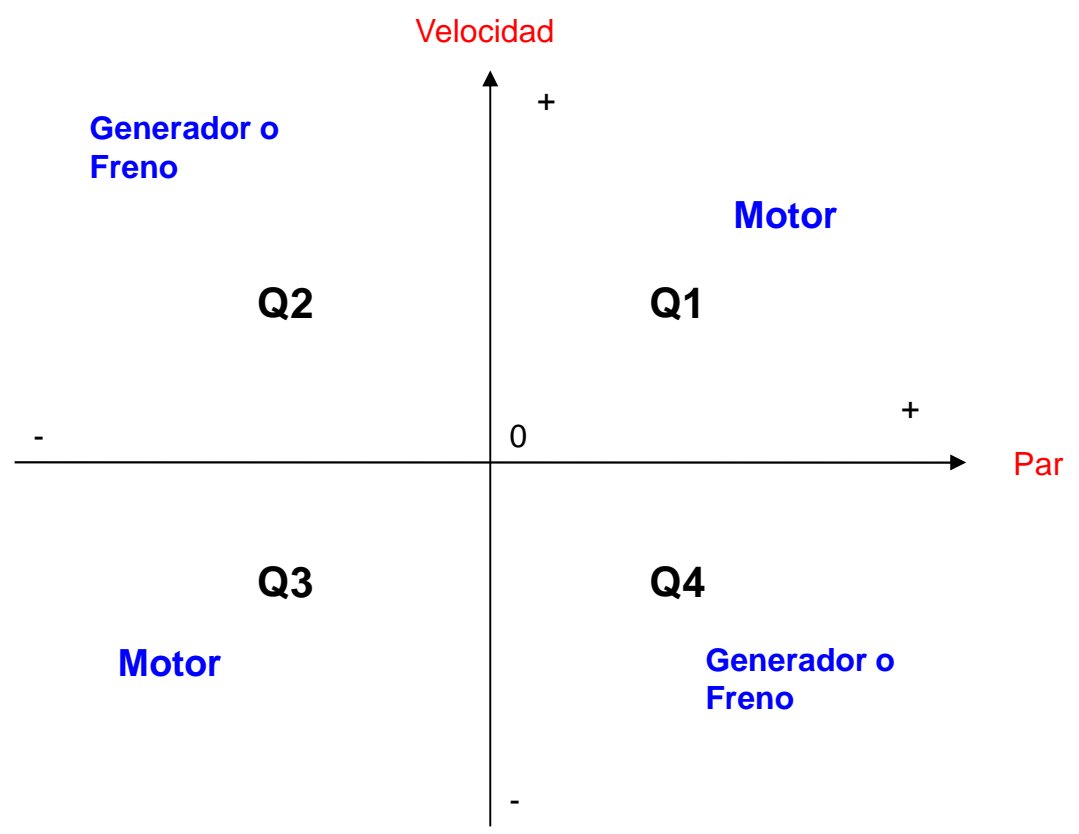
### Precisión.

Se precisa precisión para:

- Mantener la velocidad
- Parar en posición
- Par a bajas revoluciones

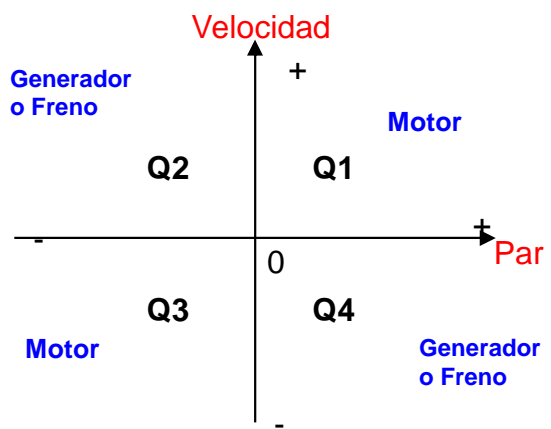


# Los cuatro cuadrantes

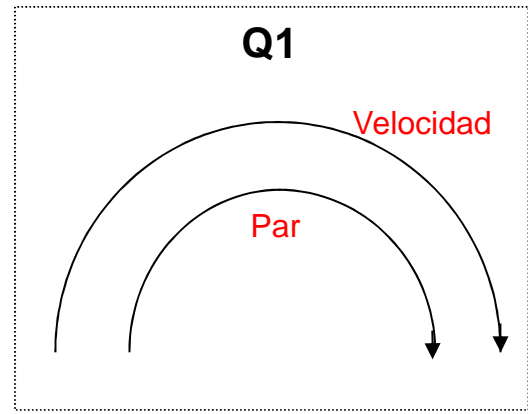
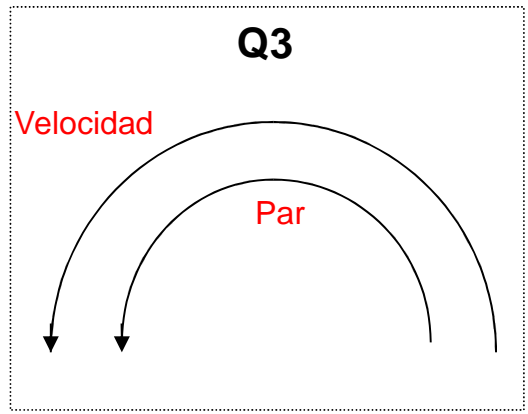
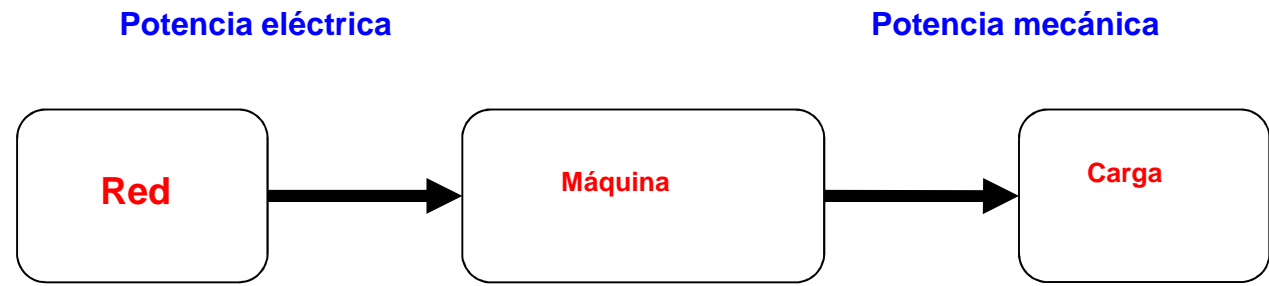




# Los cuatro cuadrantes

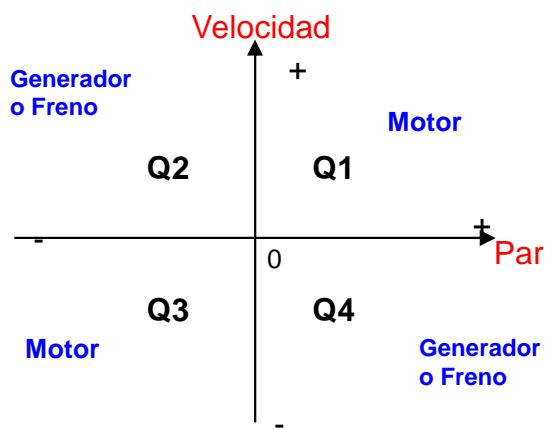


**Funcionamiento como motor (carga arrastrada).**

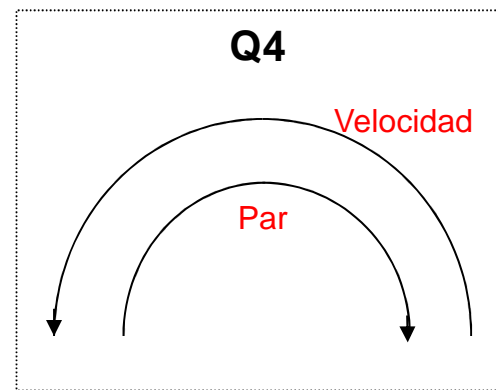
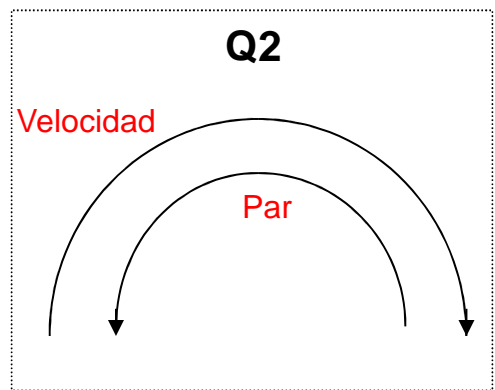
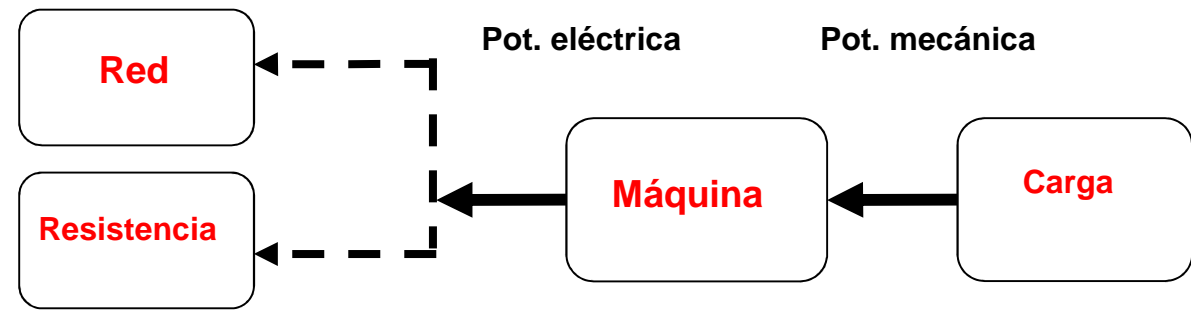




# Los cuatro cuadrantes

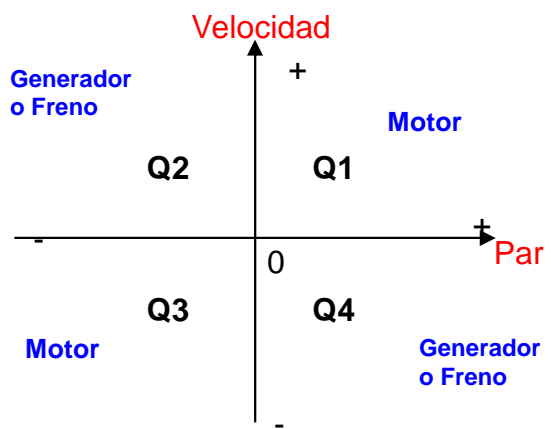


**Funcionamiento como generador (carga arrastrante).**

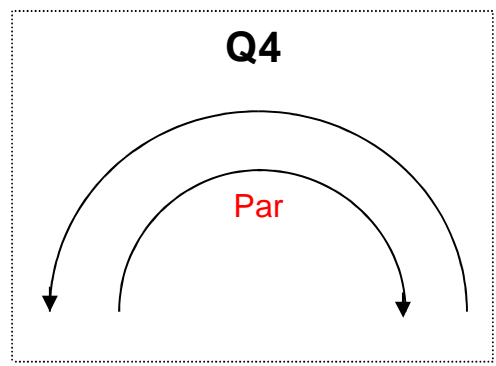
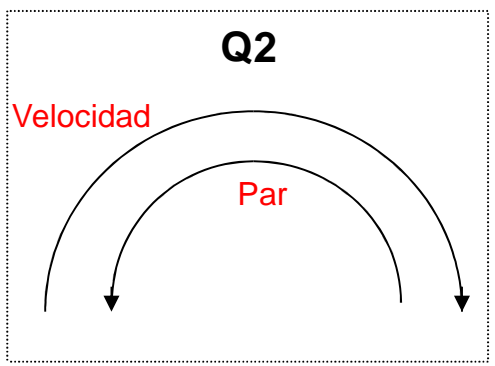
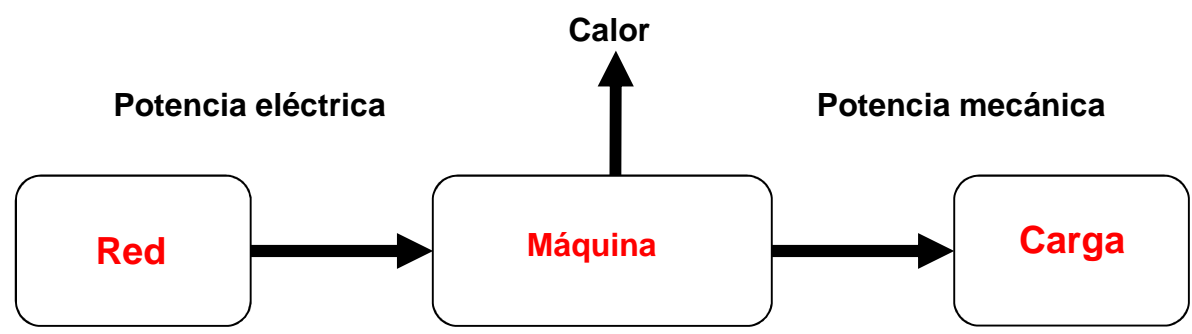




# Los cuatro cuadrantes



**Funcionamiento como freno.**





## Tipos de cargas según el par resistente

$$M_r = M_{00} + (M_{rn} - M_{r0}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x$$

$$P = M_r \cdot \omega$$

- ✚ Par resistente constante
- ✚ Par resistente proporcional a la velocidad
- ✚ Par resistente proporcional al cuadrado de la velocidad
- ✚ Par resistente proporcional al inverso de la velocidad

## Tipos de cargas según el par resistente

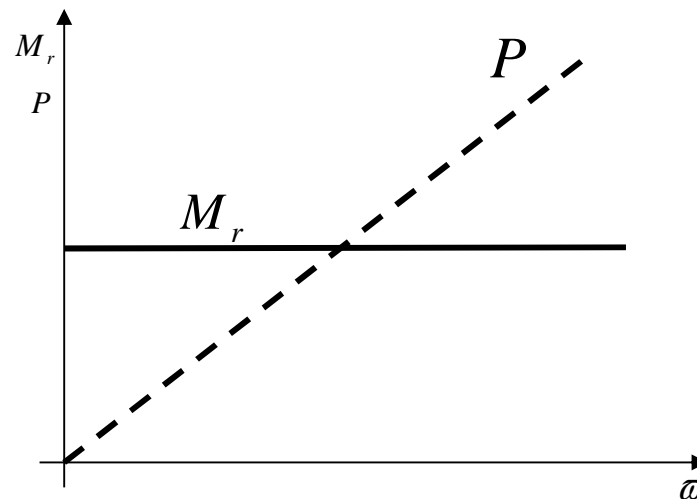
### Características de par resistente constante ( $x=0$ )

- Aparatos de elevación
- Mecanismos de avance de las máquinas herramientas
- Bombas de pistón
- Trenes de laminación
- Transporte horizontal (80% de los casos)
- Cintas transportadoras con masa constante, etc.

$$M_r = k$$

$$P = M_r \cdot \omega \rightarrow$$

$$P = k \cdot \omega$$

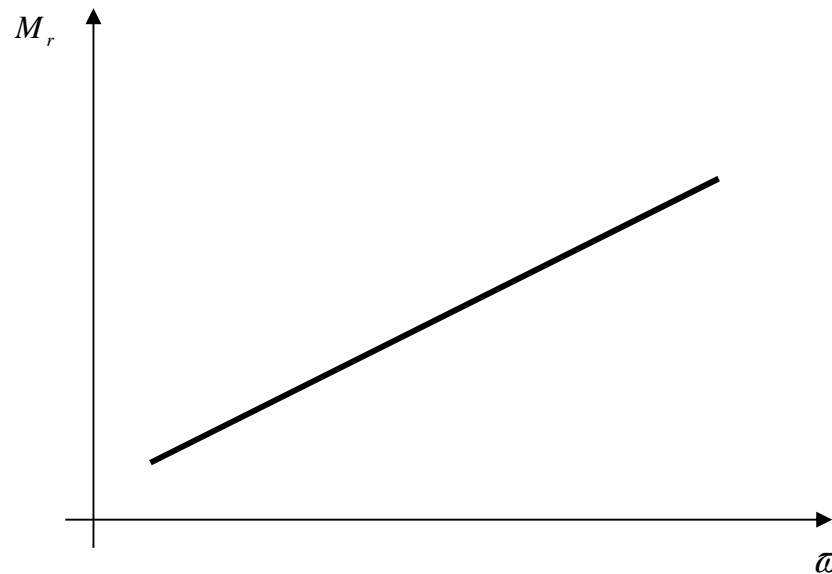




## Tipos de cargas según el par resistente

### Características de par resistente proporcional a la velocidad ( $x=1$ )

- ✚ Accionamiento de un generador de excitación independiente cuando este actúa sobre una carga exterior fija.



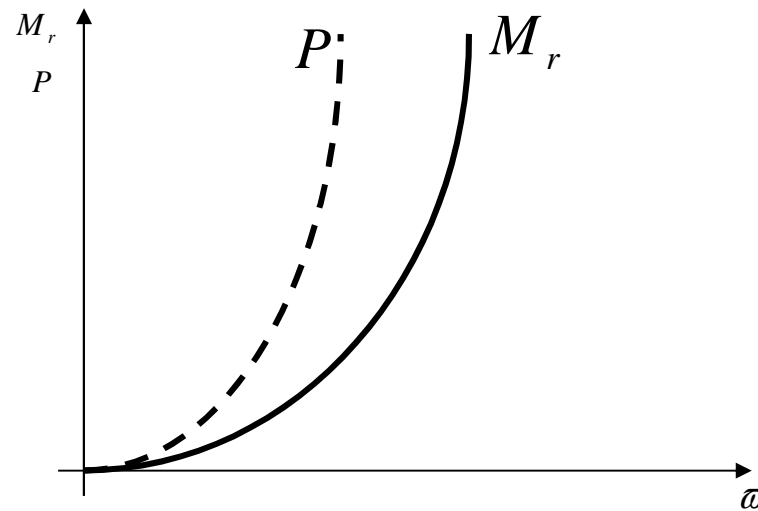
## Tipos de cargas según el par resistente

### Características de par resistente proporcional al cuadrado de velocidad (x=2)

- ➔ Ventiladores
- ➔ Compresores
- ➔ Bombas centrífugas
- ➔ Hélices de buques, etc.

$$M_r = k \cdot \omega^2$$

$$P = M_r \cdot \omega \rightarrow P = k \cdot \omega^3$$



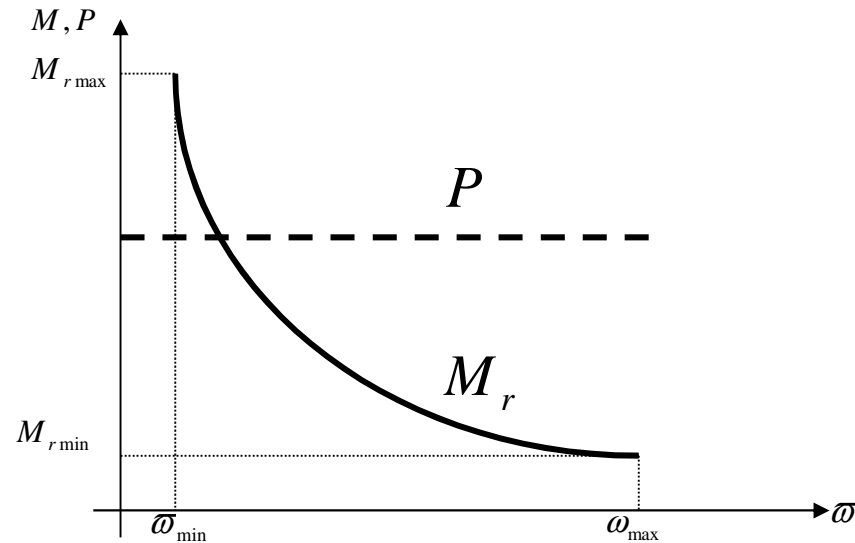
## Tipos de cargas según el par resistente

Características de par resistente proporcional al inverso de la velocidad ( $x=-1$ )

- ➔ Enrollador, desenrollador
- ➔ Ciertos tornos
- ➔ Otras máquinas herramientas de corte, etc.

$$M_r = \frac{k}{\omega}$$

$$P = M_r \cdot \omega \rightarrow P = k$$



# Tipos más habituales de cargas mecánicas

$$T_R = K * N^2$$

- ❑ Bombas centrífugas
- ❑ Compresores centrífugos
- ❑ Ventiladores y soplantes
- ❑ Centrifugadoras

$$T_R = K$$

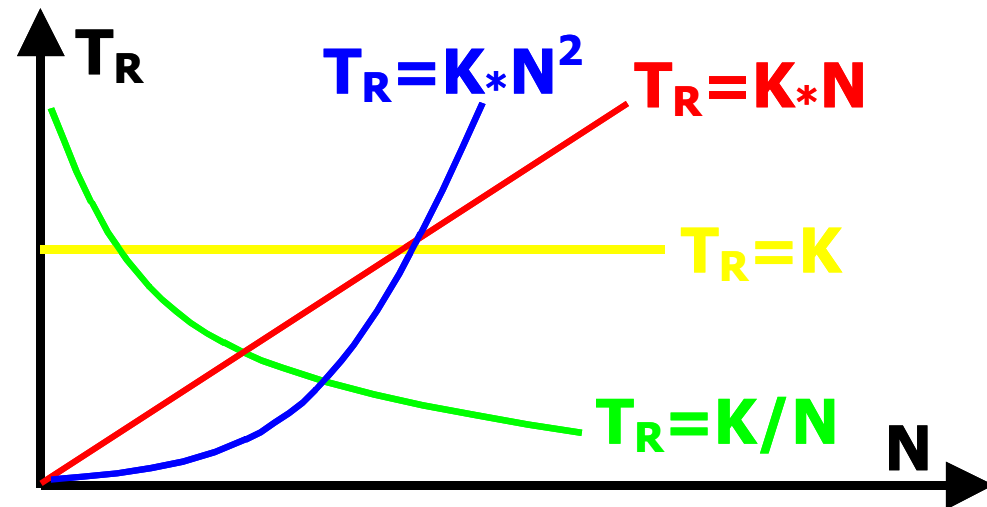
- ❑ Máquinas elevación
- ❑ Cintas transportadoras
- ❑ Machacadoras y trituradoras
- ❑ Compresores y bombas de pistones

$$T_R = K * N$$

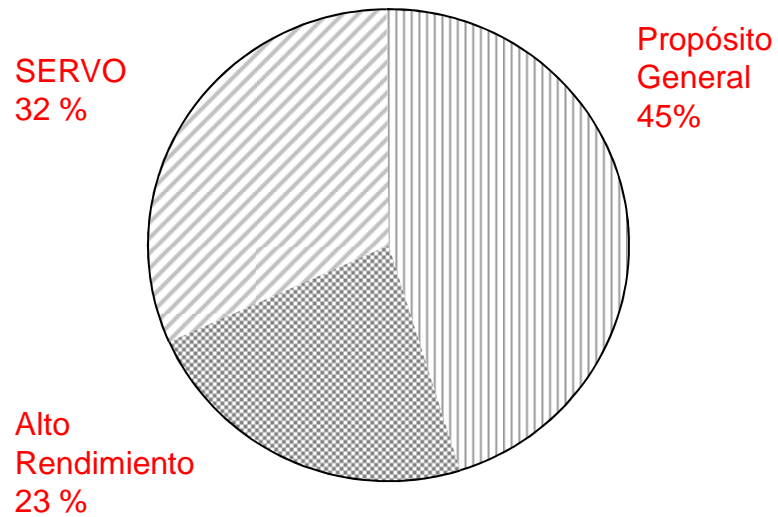
- ❑ Prensas
- ❑ Máquinas herramientas

$$T_R = K / N$$

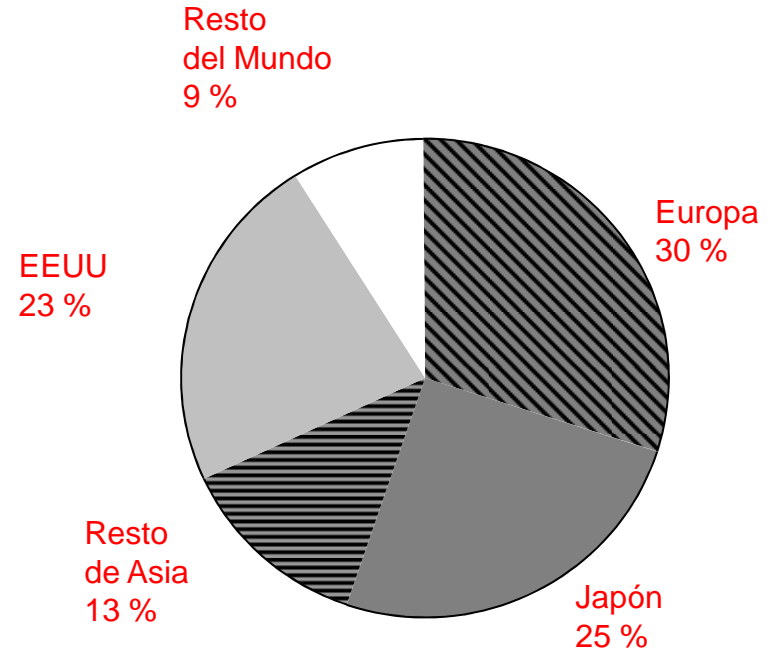
- ❑ Bobinadoras
- ❑ Máquinas fabricación chapa



# Reguladores de velocidad. Estado actual



*Distribución de los reguladores en el mercado.*



*Reparto del mercado de los reguladores por regiones.*