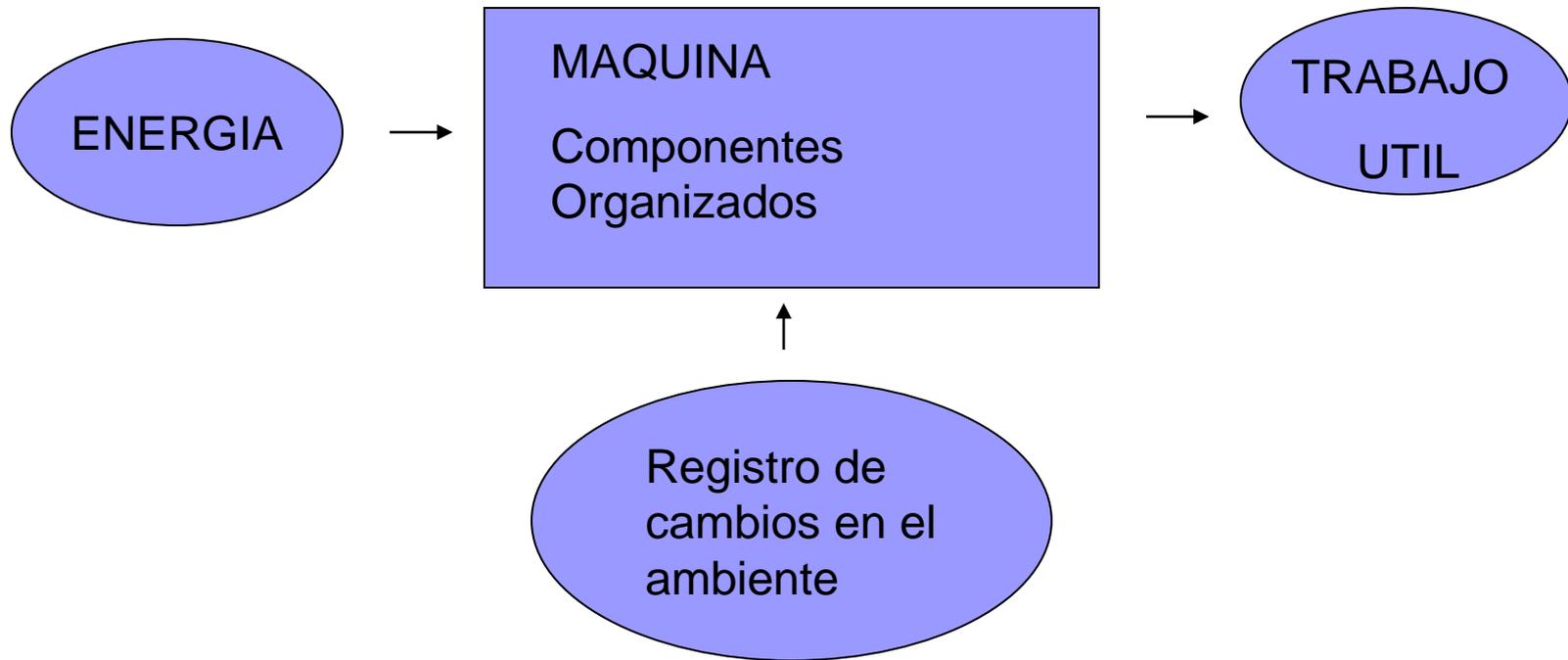


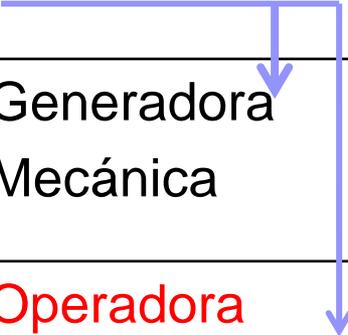
# CONCEPTO DE MAQUINA



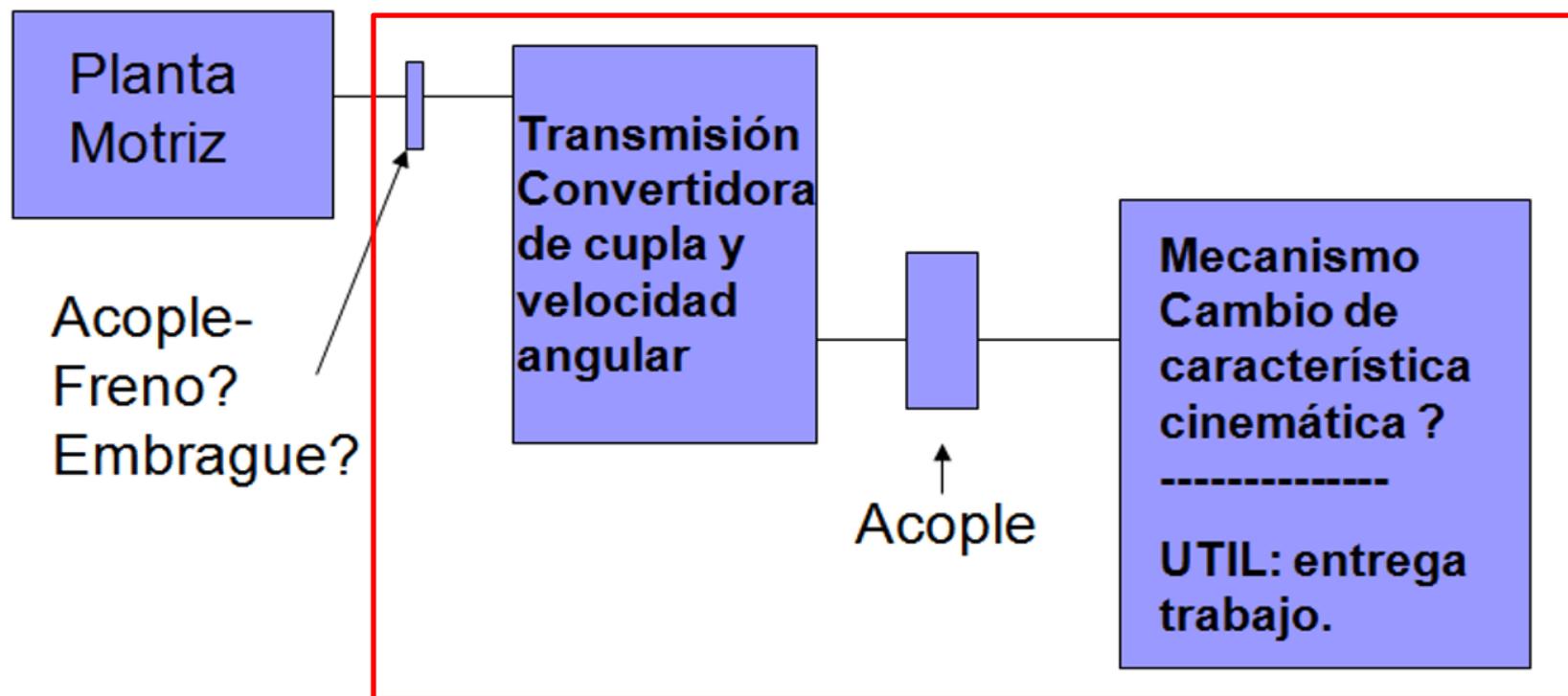
COMPONENTE MECANICO : SÓLIDO QUE INTERCAMBIA ENERGIA MEDIANTE FUERZAS DE CONTACTO Y MOVIMIENTOS CON CARACTERISTICAS CINEMATICAS DEFINIDAS EN PUNTOS DE SU SUPERFICIE.

# UNA POSIBLE CLASIFICACION.....

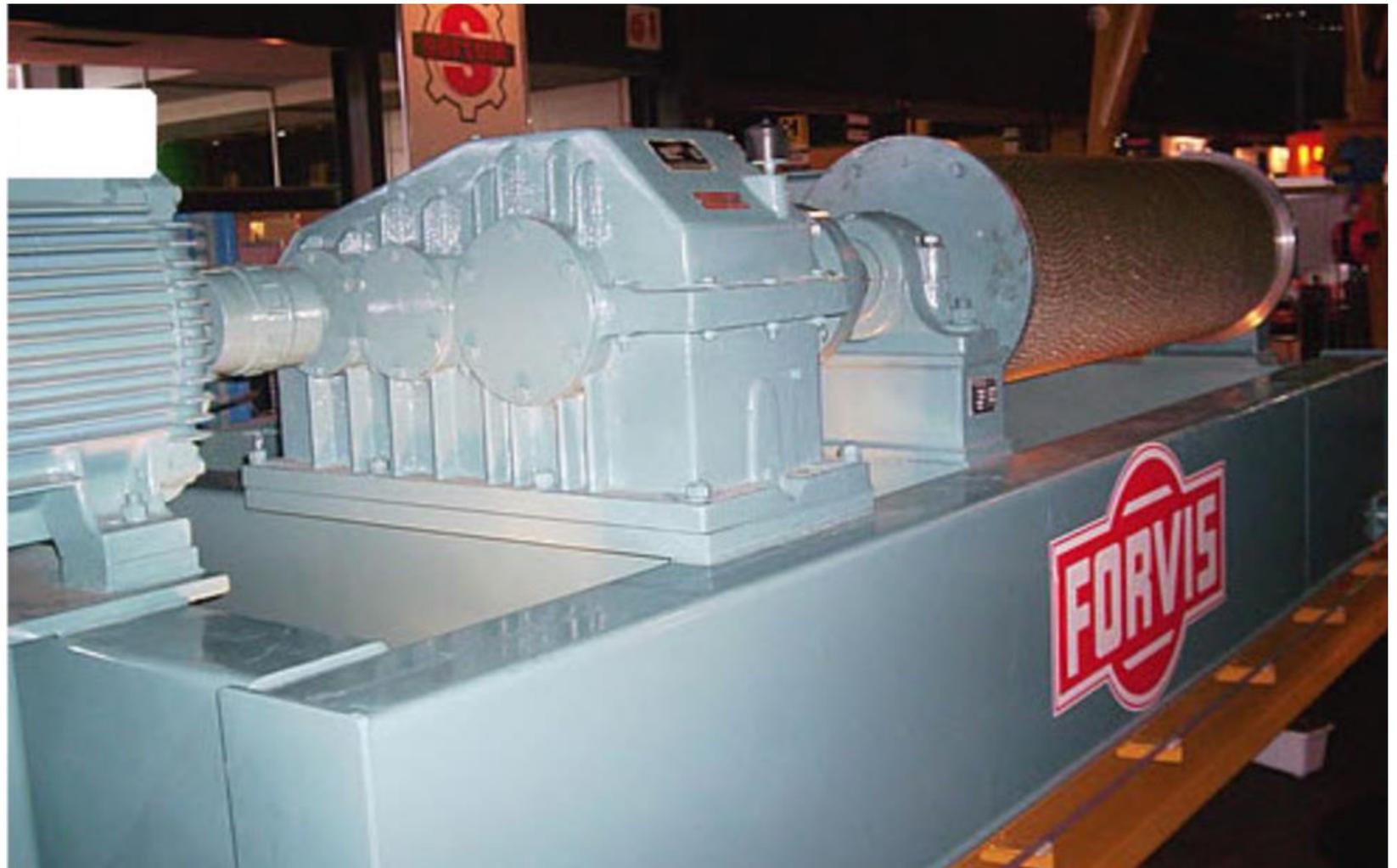
TIPO DE MAQUINA	FUENTE DE ENERGIA	TIPO DE COMPONENTE	TIPO DE TRABAJO UTIL
Definida en General	No Especificada	No Especificado	No Especificado
Maquina Mecánica	No Especificada	Mecánico	Mecánico
Generadora Mecánica	No Especificada	Mecánico	Mecánico Especificado
Operadora Mecánica (resistencial)	Mecánica Especificada	Mecánico	Mecánico Particular



# ESQUEMA TIPOICO DE MAQUINA MECANICA



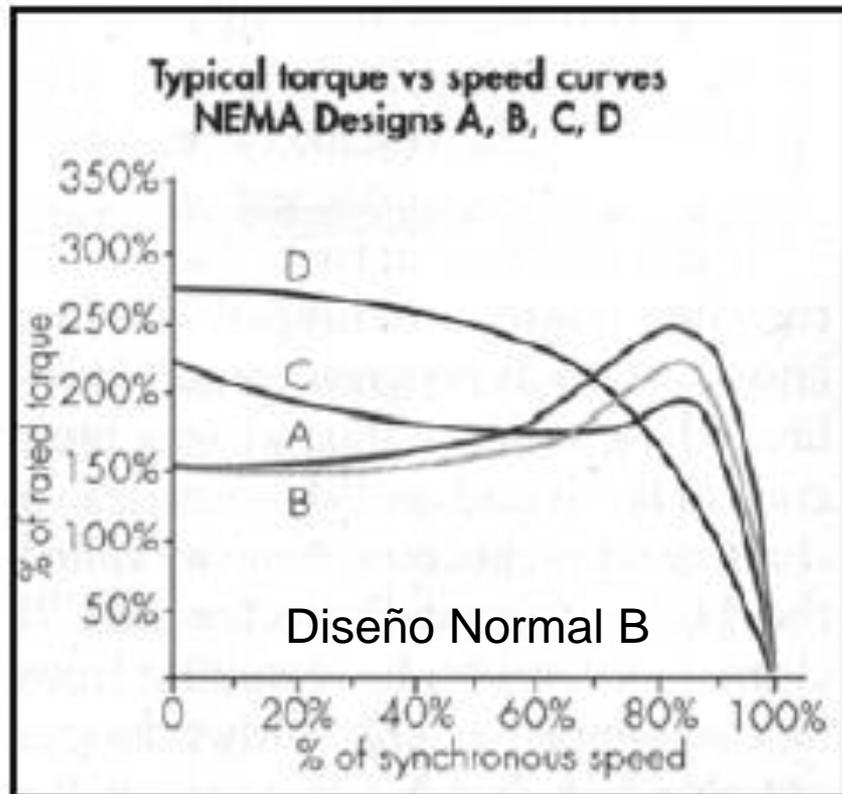
- Los reductores/aceleradores de velocidad angular son convertidores de par que ajustan par y velocidad a las condiciones necesarias en el útil.



# Características Mecánicas Tipificadas

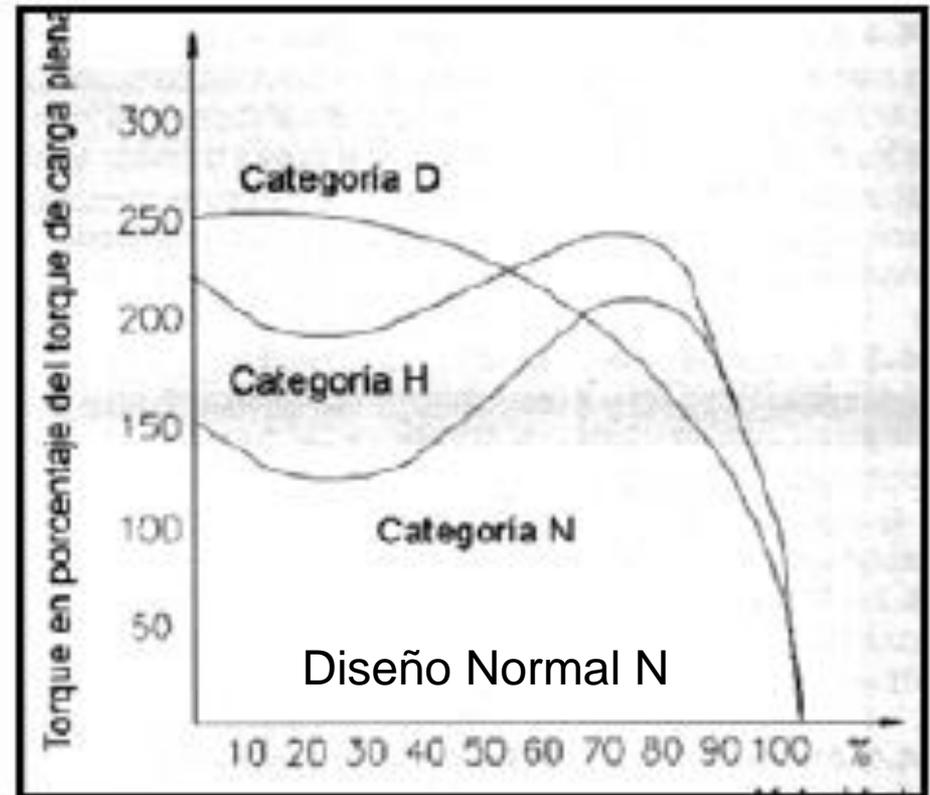
## NEMA

(National Electric  
Manufacturers association)



## IEC

(International Electronic Comision)



Tipo A tiene cupla entre 150 y 170 % de la cupla nominal y soporta sobrecargas importantes en periodos cortos. Ej. Maquinas inyectoras de plástico o metales.

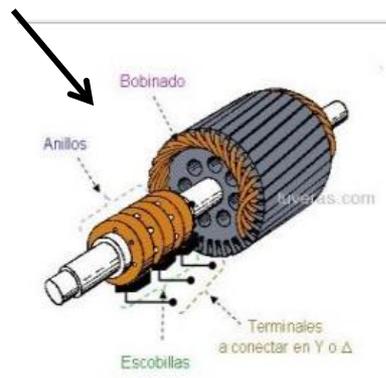
Tipo B cupla de arranque ligeramente superior con menor cupla máxima. Se diferencia por requerir menor circulación de corriente en arranque u otras sobrecargas y tener buen rendimiento y factor de potencia a cupla nominal.

Tipo C mejor cupla con baja corriente en el arranque. Se observa una apreciable variación de cupla con la corriente. Se aplica a maquinas con carga pesada y bajas sobrecargas.

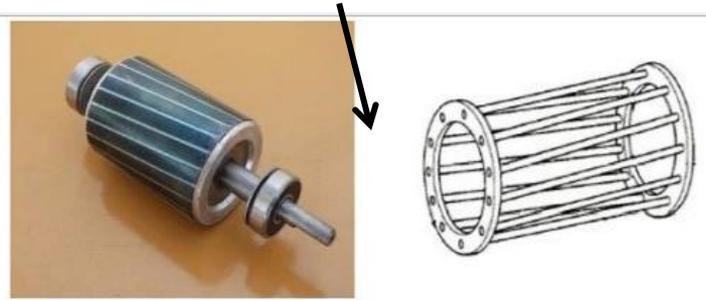
Tipo D mayor cupla de carga del grupo con gran variación de la cupla con la velocidad, es un motor menos utilizado para maquinas con alta resistencia de arranque o sobrecargas con reducción de velocidad por ejemplo prensas mecánicas a volante (balancines).

# MOTORES ASINCRONICOS TRIFASICOS - ARRANQUE

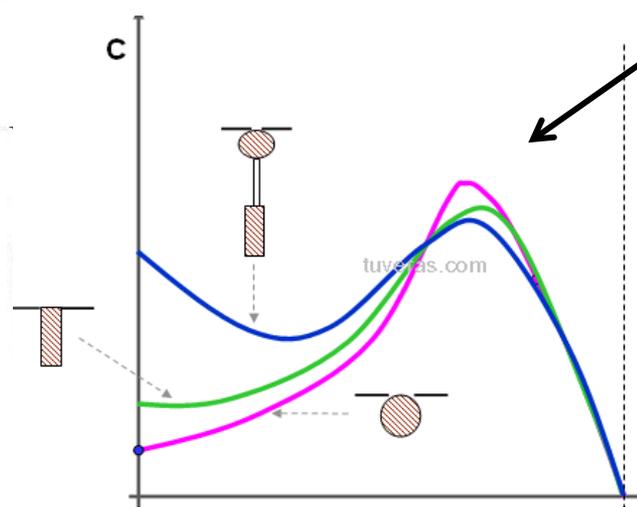
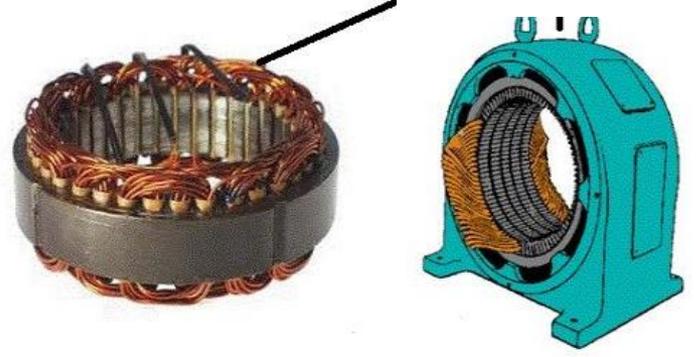
Rotor Bobinado



Rotor Jaula de ardilla



Estator



Efecto del perfil de barras de la jaula en la cupla y la corriente de arranque

Motor jaula normal		Motor de doble jaula		Motor con ranura profunda	
$I_{arrq}/I_n$	$M_{arrq}/M_n$	$I_{arrq}/I_n$	$M_{arrq}/M_n$	$I_{arrq}/I_n$	$M_{arrq}/M_n$
4-7	0.8-1.2	3.3-5.5	1-2	4-4.8	1.2-1.5



# Evaluación de tiempo de arranque “directo”

En todo instante se cumple  $M_{\text{mot}} - M_{\text{res}} = J_{\text{eq}} * \alpha = J_{\text{eq}} * dw/dt \approx J_{\text{eq}} * \Delta w/\Delta t \rightarrow$

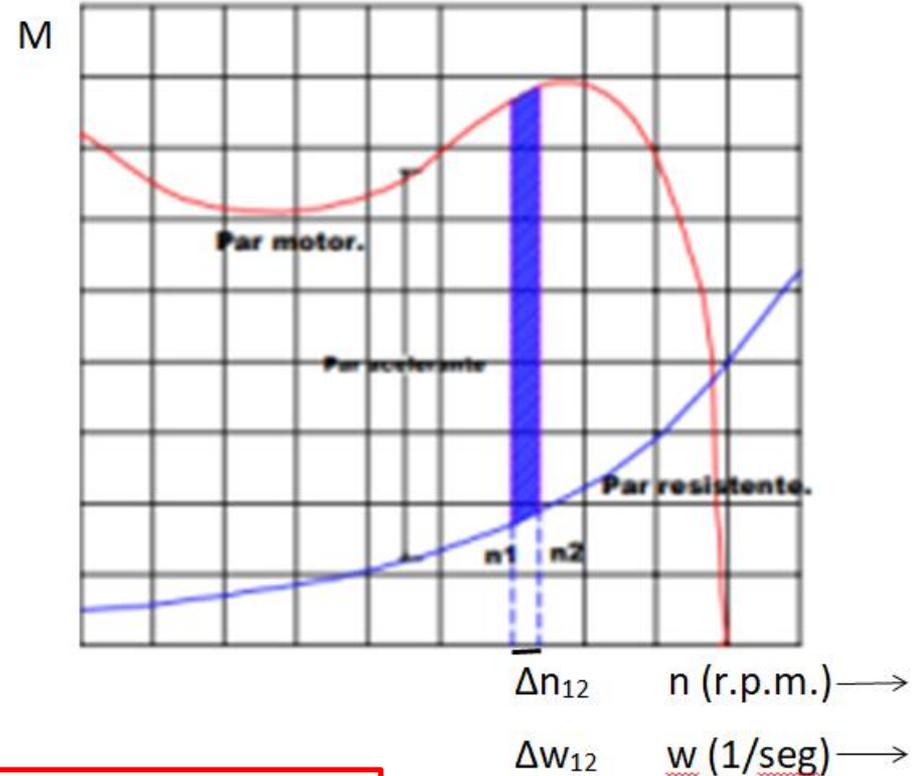
$$\Delta t_{i,i+1} = J_{\text{eq}} * \Delta w_{i,i+1} / (M_{\text{mot } i,i+1} - M_{\text{res } i,i+1})$$

Para cualquier  $\Delta t_i$

suficientemente

pequeño para asumir

$M_{\text{mot } i}$  y  $M_{\text{res } i}$  constantes  $\rightarrow$

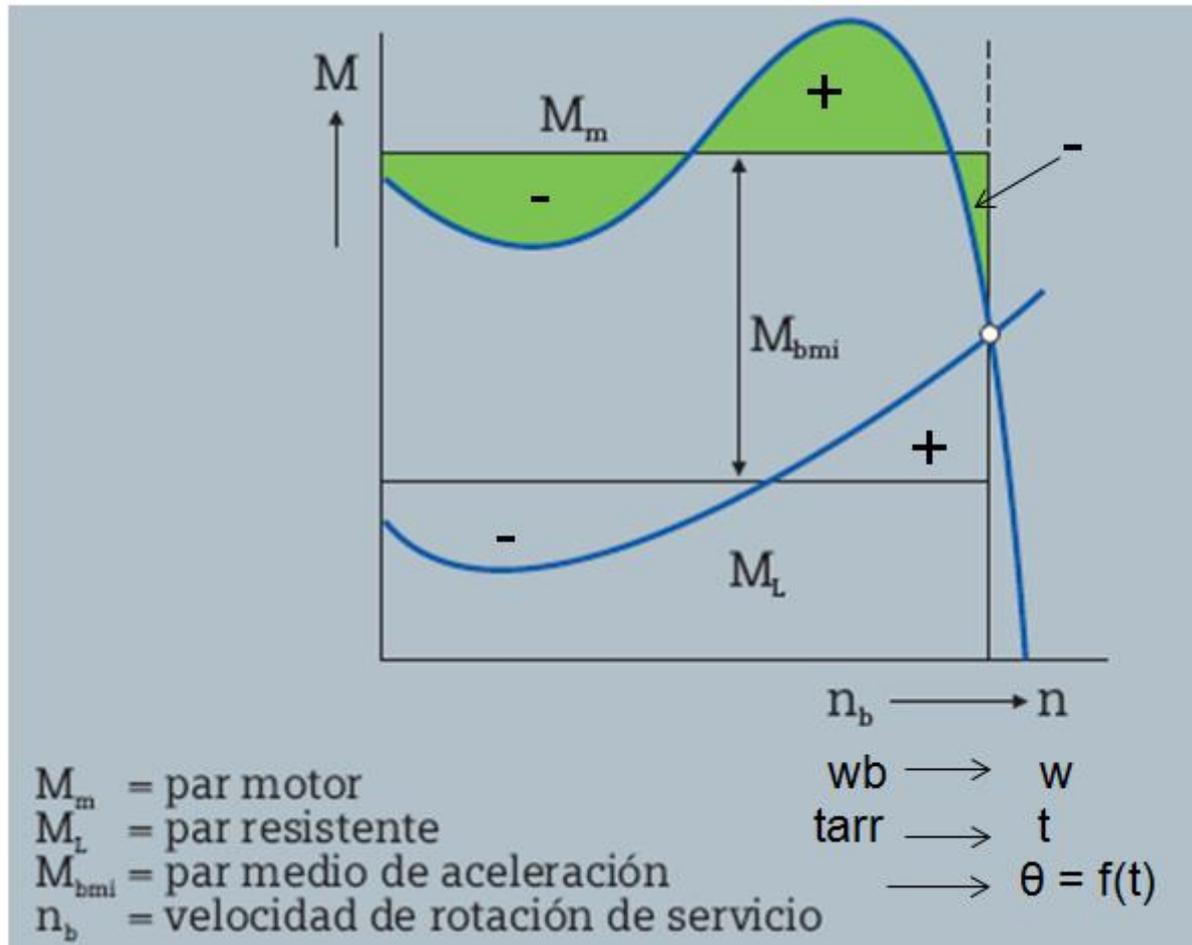


$$\rightarrow t_{\text{arr}} = \sum^{ib} \Delta t_i = \sum^{ib} J_{\text{eq}} * \Delta w_{i,i+1} / (M_{\text{mot } i,i+1} - M_{\text{res } i,i+1})$$

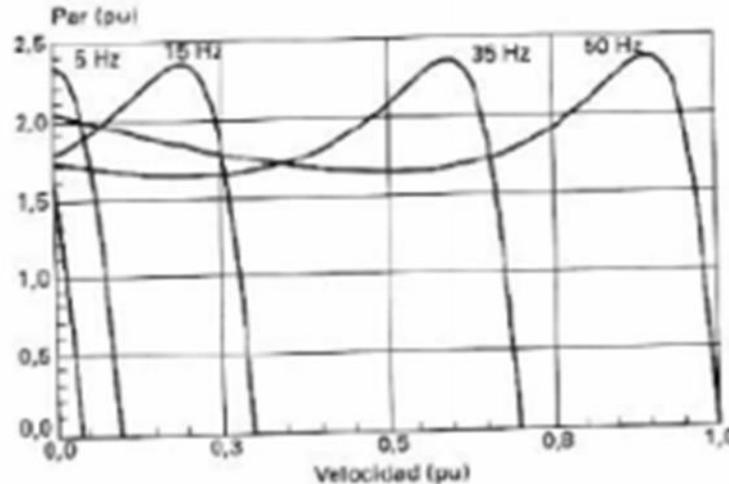
# Evaluación de tiempo de arranque “directo”

$$t_{arr} = J_{eq} * w_b / (M_{eq-mot} - M_{eq-res})$$

Método aplicable para arranques no frecuentes de duración < 9 seg.



# “Arranque suave” mediante variación de voltaje



*Curvas de par-velocidad de un motor asíncrono alimentado a flujo constante.*

Una forma de lograr que el flujo sea constante de manera aproximada, es hacer que la tensión y la frecuencia varien de forma proporcional. También determina una reducción en la corriente durante el arranque.

**LOS VALORES DE CUPLA EQUIVALENTE SOLO SE APLICAN PARA EVALUAR TIEMPOS DE ARRANQUE**

# Arranque de Motores

## ■ Principales modos de arranque

### □ Arranque directo

Se trata del modo de arranque más sencillo en el que el estator se acopla de forma directa a la red ( $\Rightarrow$  Fig.1). El motor se basa en sus características naturales.

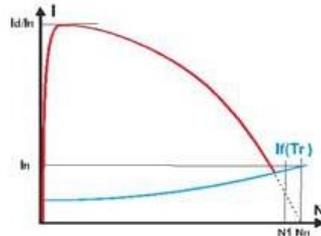
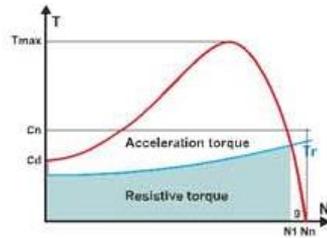
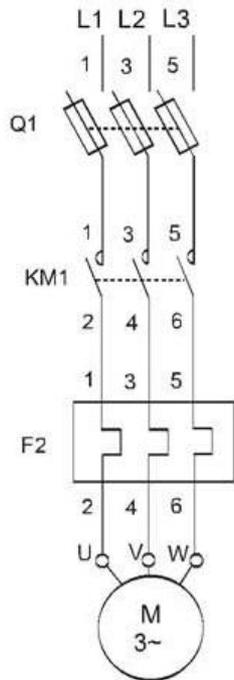
En el momento de la puesta bajo tensión, el motor actúa como un transformador cuyo secundario, formado por la jaula muy poco resistente del rotor, está en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor es importante. La corriente primaria y la secundaria son prácticamente proporcionales. Hay una punta de corriente:  $I_{\text{arranque}} = 5 \text{ a } 8 I_{\text{nominal}}$ .

El par de arranque medio es:

$C_{\text{arranque}} = 0,5 \text{ a } 1,5 C_{\text{nominal}}$ .

A pesar de las ventajas que conlleva (sencillez, elevado par de arranque, rapidez, bajo coste), sólo es posible utilizar el arranque directo en los siguientes casos:

- la potencia del motor es débil con respecto a la de la red, para limitar las perturbaciones que provoca la corriente solicitada,
- la máquina accionada no requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo mecánico que impide el arranque brusco,
- el par de arranque debe ser elevado.



↑ Fig. 1

Arranque directo

## □ Arranque estrella-triángulo

Sólo es posible utilizar este modo de arranque ( $\Rightarrow$  Fig.2) en motores en los que las dos extremidades de cada uno de los tres devanados estatóricos vuelvan a la placa de bornas. Por otra parte, el devanado debe realizarse de manera que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red: por ejemplo, en red trifásica de 380V, es preciso utilizar un motor devanado a 380V en triángulo y 660V en estrella.

El principio consiste en arrancar el motor acoplando los devanados en estrella a la tensión de la red, lo que equivale a dividir por  $\sqrt{3}$  la tensión nominal del motor en estrella (en el ejemplo anterior, la tensión de la red 380 V = 660 V /  $\sqrt{3}$ ).

La punta de corriente durante el arranque se divide por 3:

$$- I_d = 1,5 \text{ a } 2,6 I_n.$$

Un motor de 380 V/660 V acoplado en estrella a su tensión nominal de 660 V absorbe una corriente  $\sqrt{3}$  veces menor que si se acopla en triángulo a 380 V. La corriente se divide nuevamente por  $\sqrt{3}$ , por lo que en total se divide por 3.

El par de arranque se divide igualmente por 3, ya que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación:

$$C_d = 0,2 \text{ a } 0,5 C_n$$

La velocidad del motor se estabiliza cuando se equilibran el par del motor y el par resistente, normalmente entre el 75 y 85% de la velocidad nominal. En ese momento, los devanados se acoplan en triángulo y el motor rinde según sus características naturales. Un temporizador se encarga de controlar la transición del acoplamiento en estrella al acoplamiento en triángulo. El cierre del contactor de triángulo se produce con un retardo de 30 a 50 milisegundos tras la apertura del contactor de estrella, lo que evita un cortocircuito entre fases.

La corriente que recorre los devanados se interrumpe con la apertura del contactor estrella y se restablece con el cierre del contactor de triángulo. El paso al acoplamiento en triángulo va acompañado de una punta de corriente transitoria, tan breve como importante, debida a la  $f_{cem}$  del motor.

El arranque estrella-triángulo es apropiado para las máquinas cuyo par resistente es débil o que arrancan en vacío. Dependiendo del régimen transitorio en el momento del acoplamiento en triángulo, puede ser necesario utilizar una variante que limite los fenómenos transitorios cuando se supera cierta potencia; existen varios sistemas

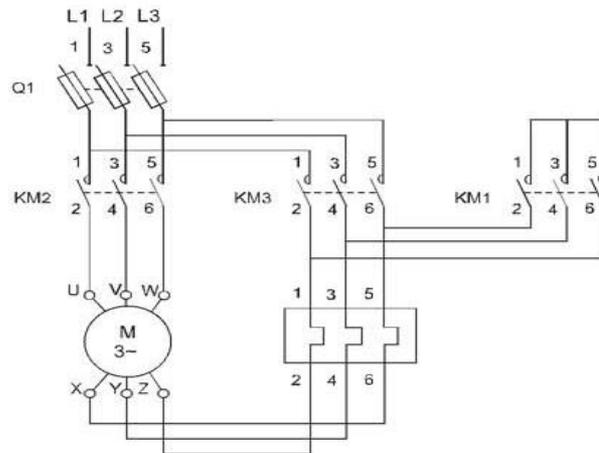
Un sistema es introducir una temporización de 1 a 2 segundos al paso estrella-triángulo. Esta medida permite disminuir la  $f_{cem}$  y, por tanto, la punta de corriente transitoria.

Esta variante sólo puede utilizarse en máquinas cuya inercia sea suficiente para evitar una deceleración excesiva durante la temporización.

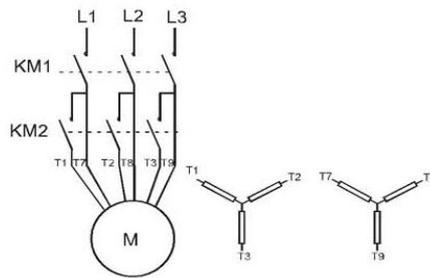
Otro sistema es arrancar en 3 tiempos: estrella-triángulo + resistencia-triángulo.

El corte se mantiene, pero la resistencia se pone en serie aproximadamente durante tres segundos con los devanados acoplados en triángulo. Esta medida reduce la punta de corriente transitoria.

El uso de estas variantes conlleva la instalación de componentes adicionales y el consiguiente aumento del coste total.



↑ Fig. 2 Arranque estrella-triángulo



↑ Fig. 3 Arranque "part-winding"

#### □ Arranque de motores de devanados partidos "part-winding"

Este sistema (⇒ Fig.3), poco utilizado en Europa, es muy común en el mercado norteamericano (tensión de 230/460 V, relación igual a 2). Este tipo de motor está dotado de un devanado estático desdoblado en dos devanados paralelos con seis o doce bornas de salida. Equivale a dos "medios motores" de igual valor de potencia.

Durante el arranque, un solo "medio motor" se acopla en directo a plena tensión a la red, lo que divide aproximadamente por dos tanto la corriente de arranque como el par. No obstante, el par es superior al del arranque estrella-triángulo de un motor de jaula de igual potencia.

Al finalizar el arranque, el segundo devanado se acopla a la red. En ese momento, la punta de corriente es débil y de corta duración, ya que el motor no se ha separado de la red de alimentación y su deslizamiento ha pasado a ser débil.

#### □ Arranque estático por resistencias

Con este sistema (⇒ Fig.4), el motor arranca bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados. Una vez se estabiliza la velocidad, las resistencias se eliminan y el motor se acopla directamente a la red. Normalmente, se utiliza un temporizador para controlar la operación.

El acoplamiento de los devanados no se modifica. Así, pues, no es necesario que las dos extremidades de cada devanado sobresalgan de la placa de bornas.

El valor de la resistencia se calcula en base a la punta de corriente que no se debe superar durante el arranque, o al valor mínimo del par de arranque necesario teniendo en cuenta el par resistente. Corriente y par de arranque generalmente valen:

- $I_d = 4,5 I_n$
- $C_d = 0,75 C_n$

Durante la fase de aceleración con las resistencias, la tensión que se aplica a las bornas del motor no es constante. Equivale a la tensión de la red menos la caída de tensión que tiene lugar en la resistencia de arranque.

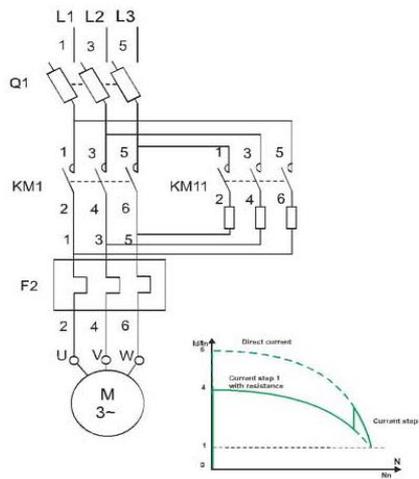
La caída de tensión es proporcional a la corriente absorbida por el motor. Dado que la corriente disminuye a medida que se acelera el motor, sucede lo mismo con la caída de tensión de la resistencia. Por tanto, la tensión que se aplica a las bornas es mínima en el momento del arranque y aumenta progresivamente.

Dado que el par es proporcional al cuadrado de la tensión de las bornas del motor, aumenta más rápidamente que en el caso del arranque estrella-triángulo, en el que la tensión permanece invariable mientras dura el acoplamiento en estrella.

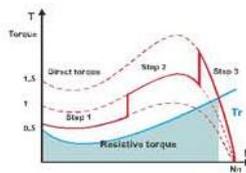
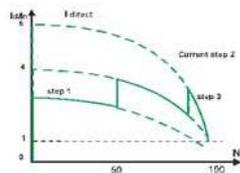
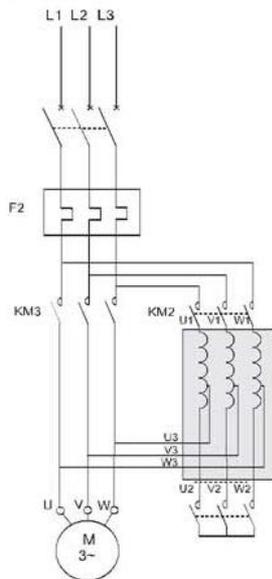
Este tipo de arranque es, por tanto, apropiado para las máquinas cuyo par resistente crece con la velocidad, por ejemplo los ventiladores.

Su inconveniente consiste en que la punta de corriente es relativamente importante durante el arranque. Sería posible reducirla mediante el aumento del valor de la resistencia, pero esta medida conllevaría una caída de tensión adicional en las bornas del motor y, por tanto, una considerable reducción del par de arranque.

Por el contrario, la eliminación de la resistencia al finalizar el arranque se lleva a cabo sin interrumpir la alimentación del motor y, por tanto, sin fenómenos transitorios.



↑ Fig. 4 Arranque estático por resistencias



↑ Fig. 5 Arranque por autotransformador



### □ Arranque por autotransformador

El motor se alimenta a tensión reducida mediante un autotransformador que, una vez finalizado el arranque, queda fuera del circuito (⇒ Fig. 5).

El arranque se lleva a cabo en tres tiempos:

- en el primer tiempo, el autotransformador comienza por acoplarse en estrella y, a continuación, el motor se acopla a la red a través de una parte de los devanados del autotransformador. El arranque se lleva a cabo a una tensión reducida que se calcula en función de la relación de transformación. Por norma general, el transformador permite seleccionar la relación de transformación,
- antes de pasar al acoplamiento a plena tensión, la estrella se abre. En ese momento, la fracción de devanado conectada a la red crea una inductancia en serie con el motor. Esta operación se realiza cuando se alcanza la velocidad de equilibrio, al final del primer tiempo,
- el acoplamiento a plena tensión interviene a partir del segundo tiempo, muy corto (fracción de segundo). Las inductancias en serie con el motor se cortocircuitan y, a continuación, el dispositivo queda fuera del circuito.

4

La corriente y el par de arranque varían en la misma proporción. Se dividen por  $(U_{\text{red}} / U_{\text{reducida}})^2$ .

Se obtienen los valores siguientes:

$$I_d = 1,7 \text{ a } 4 I_n$$

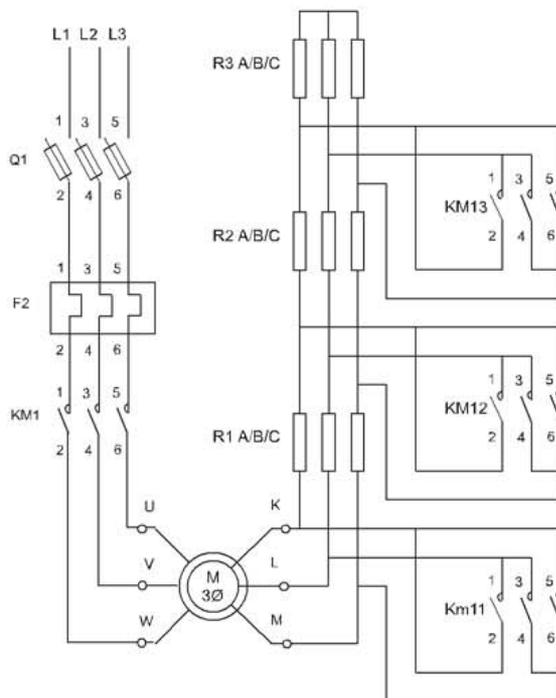
$$C_d = 0,5 \text{ a } 0,85 C_n$$

El arranque se lleva a cabo sin interrupción de corriente en el motor, lo que evita que se produzcan fenómenos transitorios.

No obstante, si no se toman ciertas precauciones pueden aparecer fenómenos transitorios de igual naturaleza durante el acoplamiento a plena tensión. De hecho, el valor de la inductancia en serie con el motor tras la apertura de la estrella es importante si se compara con la del motor. Como consecuencia, se produce una caída de tensión considerable que acarrea una punta de corriente transitoria elevada en el momento del acoplamiento a plena tensión. El circuito magnético del autotransformador incluye un entrehierro que disminuye el valor de la inductancia para paliar este problema. Dicho valor se calcula de modo que, al abrirse la estrella en el segundo tiempo, no haya variación de tensión en las bornas del motor.

El entrehierro aumenta la corriente magnetizante del autotransformador. Dicha corriente aumenta la corriente solicitada en la red durante el primer tiempo del arranque.

Este modo de arranque suele utilizarse en motores de BT con potencia superior a 150 kW. Sin embargo, el precio de los equipos es relativamente alto debido al elevado coste del autotransformador.



### □ Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos

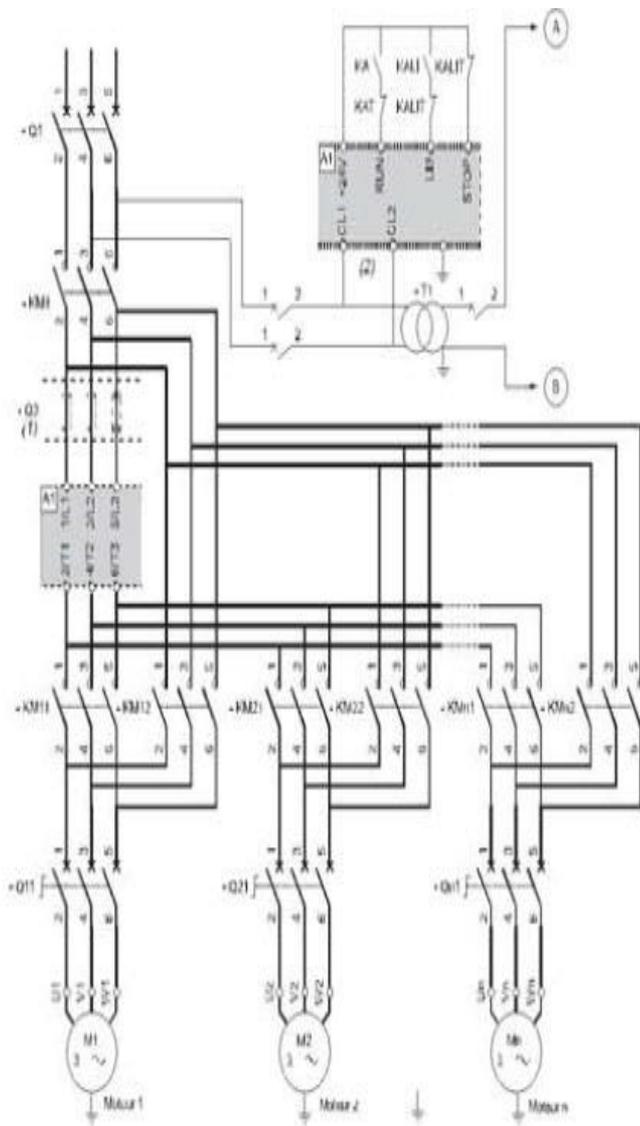
Un motor de anillos no puede arrancar en directo (devanados rotóricos en cortocircuito) sin provocar puntas de corriente inadmisibles. Es necesario insertar en el circuito rotórico ( $\Rightarrow$  Fig.6) resistencias que se cortocircuiten progresivamente, al tiempo que se alimenta el estator a toda la tensión de red.

El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar con rigor la curva par-velocidad resultante: para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia. Así, ésta debe insertarse por completo en el arranque y la plena velocidad se alcanza cuando la resistencia está cortocircuitada.

La corriente absorbida es casi proporcional al par que se suministra. Como máximo, es ligeramente superior a este valor teórico.

Por ejemplo, la punta de corriente correspondiente a un par de arranque de  $2 C_n$  es aproximadamente de  $2 I_n$ . Por tanto, la punta es considerablemente más débil y el par máximo de arranque más elevado que en el caso de un motor de jaula, en el que el valor normal se sitúa en torno a  $6 I_n$  para  $1,5 C_n$ . El motor de anillos con arranque rotórico se impone, por tanto, en todos los casos en los que las puntas de corriente deben ser débiles y cuando se debe arrancar a plena carga.

Por lo demás, este tipo de arranque es sumamente flexible, ya que resulta fácil adaptar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los requisitos mecánicos o eléctricos (par resistente, valor de aceleración, punta máxima de corriente, etc.).



↑ Fig. 7

Arranque de múltiples motores con un "soft starter"

punta máxima de corriente, etc.).

### □ Arranque electrónico "soft starter"

Este es un sistema de arranque efectivo ( $\approx$  Fig.7) para arrancar y parar un motor de manera suave (*ver la sección de control electrónico de velocidad para más detalles*).

Se puede usar para:

- limitar la corriente,
- ajustar el par.

El control por limitación de corriente establece un valor máximo para ésta durante la fase de arranque y limita las prestaciones del par. Este control es especialmente adecuado para "turbomáquinas" (bombas centrífugas, ventiladores).

El control por ajuste de par optimiza las prestaciones de éste en la fase de arranque y reduce el valor de la corriente. Este control es perfecto para máquinas con par constante.

Este tipo de arranque puede tener diferentes diagramas:

- funcionamiento unidireccional,
- funcionamiento bidireccional,
- derivación de dispositivos al final del proceso de arranque,
- arranque y frenado de varios motores en cascada ( $\approx$  Fig.7),
- etc.

### □ Arranque por convertidor de frecuencia

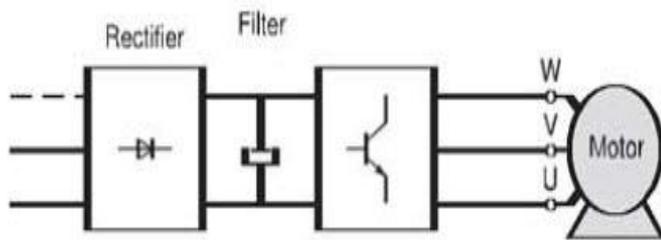
Representa otro sistema efectivo de arranque ( $\approx$  Fig.8) a usar siempre que se quiera controlar y ajustar la velocidad (*ver la sección de control electrónico de velocidad para más detalles*).

Se utiliza con el objetivo de:

- arrancar con cargas de gran inercia,
- arrancar con grandes cargas en redes de baja capacidad de cortocircuito,
- optimizar el consumo eléctrico adaptando la velocidad de lo que se conoce como "turbomáquinas".

Este sistema de arranque se puede usar en todos los tipos de máquina.

Indicar que esta solución en principio está pensada para ajustar la velocidad del motor, por lo que el arranque es una aplicación secundaria.



↑ Fig. 8

Esquema de un convertidor de frecuencia

# Tabla Comparativa de Arranques

	Directo	Estrella Triángulo	"Part winding"	Resistencias	Autotransformador	Motor anillos	"Soft starter"	Convertidor frecuencia
Motor	Estándar	Estándar	6 devanados	Estándar	Estándar	Específico	Estándar	Estándar
Coste	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++
Corriente arranque motor	5 a 10 I <sub>n</sub>	2 a 3 I <sub>n</sub>	2 I <sub>n</sub>	Aprox. 4.5 I <sub>n</sub>	1.7 a 4 I <sub>n</sub>	Aprox. 2 I <sub>n</sub>	4 a 5 I <sub>n</sub>	I <sub>n</sub>
Caida de tensión	Alta	Alta en el cambio de conexión	Baja	Baja	Baja; precaución al conectar en directo	Baja	Baja	Baja
Harmónicos de tensión y corriente	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo	Alto	Alto
Factor de potencia	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado	Bajo	Alto
Número de arranq. disponibles	Restringido	2-3 veces más que directo	3-4 veces más que directo	3-4 veces más que directo	3-4 veces más que directo	2-3 veces más que directo	Limitado	Elevado
Par disponible	Aprox. 2.5 C <sub>n</sub>	0.2 a 0.5 C <sub>n</sub>	2 C <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	Aprox. 0.5 C <sub>n</sub>	Aprox. 2 C <sub>n</sub>	Aprox. 0.5 C <sub>n</sub>	1.5 to 2 C <sub>n</sub>
Solicit. térmica	Muy alta	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Baja
Solicitud mecánica	Muy alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	Baja
Tipo de carga recomendado	Cualq.	Sin carga	Par creciente	Bombas y vent.	Bombas y vent.	Cualq.	Bombas y vent.	Cualq.
Carga gran inercia	Si*	No	No	No	No	Si	No	Si

# Arranque de Motores Monofasicos

## □ Arranque de motores monofásicos

Un motor monofásico no puede arrancar por sí solo; existen diversas maneras de hacerlo funcionar.

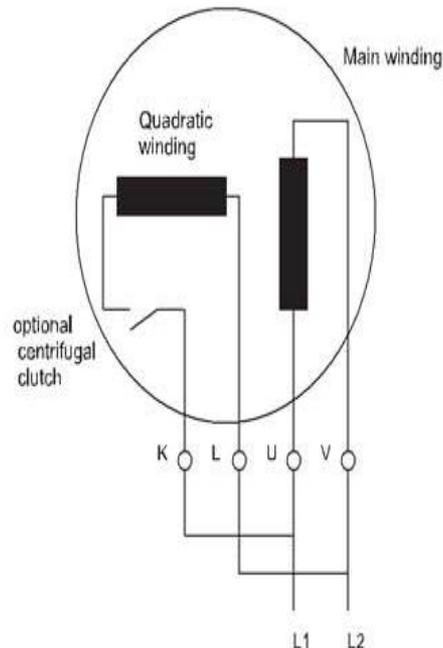
## □ Arranque por fase auxiliar

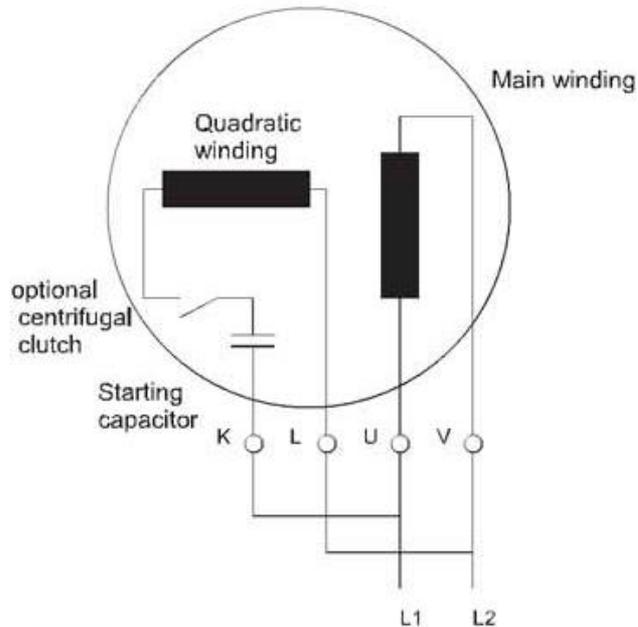
En este tipo de motores (*≈ Fig.10*), el estator consta de dos devanados con un decalado geométrico de  $90^\circ$ .

Durante la puesta en tensión, y debido a las diferencias de fabricación de los devanados, una corriente  $I_1$  atraviesa la fase principal y una corriente más débil  $I_2$  circula por la fase auxiliar con cierta diferencia de tiempo respecto de  $I_1$ . Dado que los campos están generados por dos corrientes desfasadas entre sí, el campo giratorio resultante es suficiente para provocar el arranque en vacío del motor. Cuando el motor alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad, es posible retirar del servicio (acoplador centrífugo) la fase auxiliar o bien mantenerla. De este modo, el estátor del motor está transformado en el momento del arranque o permanentemente, como estátor bifásico.

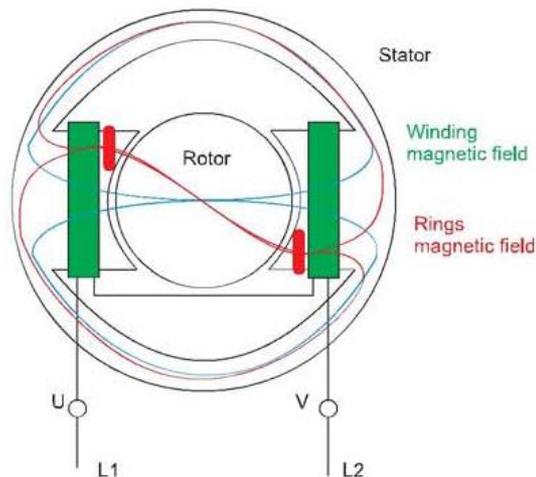
Para invertir el sentido de rotación, basta con invertir la conexiones de una fase cualquiera.

Dado que el par que se obtiene durante el arranque es débil, conviene aumentar el decalado entre los dos campos que producen los devanados.





↑ Fig. 11 Motor monofásico con arranque por fase auxiliar y condensador



↑ Fig. 12 Arranque con espira de sombra

#### □ Arranque por fase auxiliar y resistencia

Una resistencia situada en serie en la fase auxiliar aumenta tanto su impedancia como la diferencia de tiempo entre I1 y I2.

Al finalizar el arranque, el funcionamiento es idéntico al caso del método de fase auxiliar.

#### □ Arranque por fase auxiliar e inductancia

Se utiliza el principio anterior, pero la resistencia se sustituye por una inductancia montada en serie en la fase auxiliar para aumentar la diferencia entre las dos corrientes.

#### □ Arranque por fase auxiliar y condensador

Es el dispositivo más utilizado (≈ Fig.11). Consiste en situar un condensador en la fase auxiliar. Para un condensador permanente, el valor de capacidad ronda los  $8\mu\text{F}$  para un motor de 200W. En el arranque, quizá sea necesario un condensador extra de  $16\mu\text{F}$  que es eliminado una vez ha finalizado este proceso.

El condensador provoca un desfase inverso al de una inductancia. Por tanto, el funcionamiento durante el período de arranque y la marcha normal es muy similar al de un motor bifásico de campo giratorio. Por otra parte, tanto el par como el factor de potencia son más importantes. El par de arranque triplica aproximadamente el par nominal, mientras que el par máximo alcanza un valor doble.

Una vez arrancado el motor, es necesario mantener el desfase entre ambas corrientes, pero es posible reducir la capacidad del condensador, ya que la impedancia del estator ha aumentado.

El esquema (≈ Fig.11) representa un motor monofásico con un condensador permanentemente conectado. Existen otras configuraciones, como la apertura de la fase auxiliar a través de un interruptor centrífugo cuando se alcanza una velocidad.

Un motor trifásico (230/400V) se puede usar con alimentación monofásica a 230V si se utiliza un condensador de arranque y otro permanentemente conectado. Esta configuración disminuye la potencia útil (derating de aprox. 0.7), el par de arranque y la reserva térmica.

Sólo los motores de 4 polos de potencia inferior a 4kW resultan adecuados para este sistema.

Los fabricantes tienen tablas para escoger condensadores con valores adecuados.

#### □ Arranque con espira de sombra

Este dispositivo (≈ Fig.12) se utiliza en motores de muy baja potencia (alrededor de 100W). Los polos tienen unas muescas con espiras cortocircuitadas insertadas. La corriente inducida en ellas produce distorsiones en el campo rotativo y provoca el arranque del motor.

La eficiencia es baja pero adecuada en este rango de potencia.

# Frenado de Motores Eléctricos

## ■ Introducción

En algunos sistemas, los motores se paran por la deceleración natural. El tiempo que conlleva este proceso depende únicamente de la inercia y del par resistente de la máquina que acciona el motor. Sin embargo, en muchas ocasiones es necesario reducir este tiempo, y el frenado eléctrico constituye una solución eficaz y simple. Con respecto al frenado mecánico o hidráulico, ofrece la ventaja de la regularidad y no utiliza ninguna pieza de desgaste.

## ■ Frenado por contracorriente

Este método consiste en reconectar el motor a la red en sentido inverso después de haberlo aislado y mientras sigue girando. Es un método de frenado muy eficaz, pero debe detenerse con antelación suficiente para evitar que el motor comience a girar en sentido contrario, algo que no es nada deseable en la mayoría de aplicaciones.

Se utilizan varios dispositivos automáticos para controlar la parada en el momento en que la velocidad se aproxima a cero:

- detectores de parada de fricción o centrífugos,
- dispositivos cronométricos,
- relés medidores de frecuencia o de la tensión del rotor (anillos rozantes), etc.

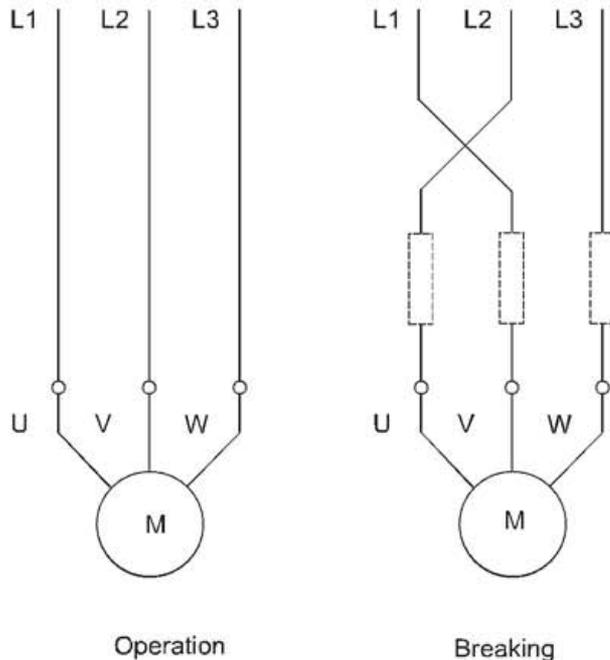
## □ Motor de jaula de ardilla

Antes de adoptar este sistema (*≅ Fig.13*), es imprescindible comprobar que el motor sea capaz de soportar frenados por contracorriente. Además de las restricciones mecánicas, este procedimiento impone ciertas limitaciones térmicas importantes al rotor, ya que la energía correspondiente a cada frenado (energía de deslizamiento tomada de la red y energía cinética) se disipa en la jaula. Las solicitaciones térmicas durante el frenado triplican las de la aceleración.

En el momento del frenado, las puntas de corriente y de par son claramente superiores a las que se producen durante el arranque.

Para obtener un frenado sin brusquedad, suele insertarse una resistencia en serie con cada fase del estator durante el acoplamiento en contracorriente. A continuación, el par y la corriente se reducen como en el arranque estático.

Los inconvenientes del frenado por contracorriente de los motores de jaula son tan importantes que este método sólo se utiliza en ciertas aplicaciones con motores de escasa potencia.



### □ Motor de anillos rozantes

Para limitar puntas de corriente y par, antes de acoplar el estator a contracorriente es obligatorio volver a insertar las resistencias rotóricas durante el arranque. También es necesario añadir una sección adicional de frenado. (⇒ Fig.14).

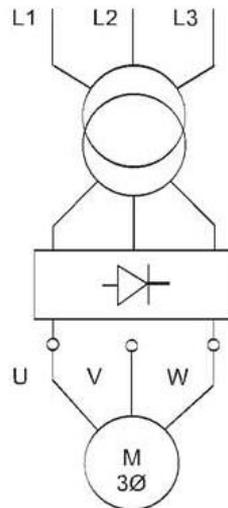
El par de frenado puede regularse fácilmente mediante la elección de una resistencia rotórica adecuada.

La tensión rotórica en el momento de la inversión es casi doble a la de la parada lo que puede obligar a tomar precauciones especiales en lo que respecta al aislamiento.

Al igual que sucede con los motores de jaula, el circuito rotórico produce una gran cantidad de energía que, en gran medida, se disipa en las resistencias.

Es posible controlar automáticamente la parada al alcanzar la velocidad nula por medio de uno de los dispositivos mencionados anteriormente o mediante la acción de un relé de tensión o de frecuencia insertado en el circuito rotórico.

Este sistema permite retener una carga arrastrante a velocidad moderada. La característica es muy inestable (fuertes variaciones de velocidad por débiles variaciones de par).



↑ Fig. 15

Principio de frenado por inyección de corriente rectificada

## ■ Frenado por inyección de corriente rectificada

Este modo de frenado se utiliza en motores de anillos y de jaula (*⇒ Fig.15*).

Comparado con el sistema de contracorriente, el coste de la fuente de corriente rectificada se ve compensado por el menor volumen de las resistencias. Con los variadores y arrancadores electrónicos, esta posibilidad de frenado se ofrece sin suplemento de precio.

El proceso consiste en enviar corriente rectificada al estator previamente separado de la red. Dicha corriente crea un flujo fijo en el espacio. Para que el valor del flujo corresponda a un frenado adecuado, la corriente debe ser aproximadamente 1.3 veces la corriente nominal. Generalmente, el excedente de pérdidas térmicas causado por esta ligera sobreintensidad se compensa por el tiempo de parada que sigue al frenado.

Dado que el valor de la corriente queda establecido por la única resistencia de los devanados del estator, la tensión de la fuente de corriente rectificada es débil. Dicha fuente suele constar de rectificadores o proceder de los variadores. Estos elementos deben poder soportar las sobretensiones transitorias producidas por los devanados recién desconectados de la red alterna (por ejemplo, a 380V eficaces).

El movimiento del rotor representa un deslizamiento con respecto a un campo fijo del espacio (mientras que, en el sistema de contracorriente, el campo gira en sentido inverso). El motor actúa como un generador síncrono que suministra corriente al rotor. Las características que se obtienen con este sistema son muy diferentes a las que resultan de un sistema de contracorriente:

- la energía disipada en las resistencias rotóricas o en la jaula es menor. Se trata del equivalente a la energía mecánica comunicada por las masas en movimiento. La única energía que procede de la red es la excitación del estator,
- si la carga no es arrastrante, el motor no vuelve a arrancar en el sentido contrario,
- si la carga es arrastrante, el sistema proporciona un frenado permanente que retiene la carga a baja velocidad. La característica es mucho más estable que en contracorriente.

En el caso de los motores de anillos, las características de par-velocidad dependen de la elección de las resistencias.

En el caso de los motores de jaula, este sistema permite regular fácilmente el par de frenado actuando sobre la corriente continua de excitación. Sin embargo, el par de frenado será menor cuando el motor funcione a gran velocidad.

Para evitar recalentamientos inútiles, es preciso prever un dispositivo que corte la corriente del estator una vez concluido el frenado.

## ■ Frenado electrónico

El frenado electrónico se consigue simplemente con un variador de velocidad y una resistencia de frenado. El motor asíncrono actúa entonces como un generador y la energía mecánica se disipa en la resistencia de frenado sin incrementar las pérdidas en el motor.

Para más información, ver la sección de control electrónico de la velocidad en *el capítulo de unidades de arranque motor*.

## ■ Frenado por funcionamiento en hipersíncrono

En este caso, el motor es accionado por su carga superando la velocidad de sincronismo, se comporta como un generador asíncrono y desarrolla un par de frenado. La red recupera prácticamente toda la pérdida de energía, a excepción de una pequeña parte que se disipa.

En el caso de los motores de elevación, este tipo de funcionamiento provoca la bajada de la carga a la velocidad nominal. El par de frenado equilibra con precisión el par generado por la carga y proporciona una marcha a velocidad constante (no una deceleración).

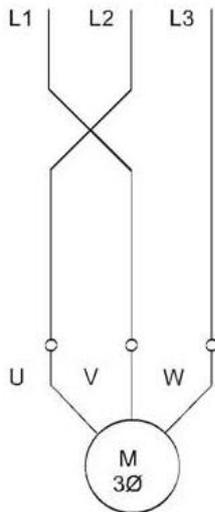
En el caso de los motores de anillos, es fundamental cortocircuitar la totalidad o parte de las resistencias rotóricas para evitar que el motor se accione a una velocidad muy superior a la nominal, con los riesgos mecánicos que ello implicaría. Este método es idóneo para un sistema de retención de carga arrastrante:

- la velocidad es estable y prácticamente independiente del par,
- la energía se recupera y se envía de nuevo a la red.

Sin embargo, sólo corresponde a una velocidad: aproximadamente a la velocidad nominal.

Los motores de varias velocidades también emplean este tipo de frenado durante el paso de alta a baja velocidad.

El frenado por funcionamiento hipersíncrono se consigue fácilmente con un variador de velocidad, donde bajando la consigna de frecuencia automáticamente se entra en este tipo de funcionamiento.



Principio de frenado por inversión de marcha de un motor asíncrono

## ■ Otros sistemas de frenado

Todavía puede encontrarse el frenado monofásico, que consiste en alimentar el motor por las dos fases de la red. En vacío, la velocidad es nula. El par de frenado está limitado a una tercera parte del par motor máximo. El frenado monofásico no puede frenar toda la carga y requiere de la ayuda del frenado por contracorriente. Algunos de sus inconvenientes son los desequilibrios y las pérdidas importantes que se producen.

Cabe mencionar igualmente el frenado por ralentizador de corrientes de Foucault. La energía mecánica se disipa en forma de calor dentro del ralentizador. La regulación del frenado se realiza con facilidad mediante un devanado de excitación. Sin embargo, el fuerte aumento de la inercia representa un gran inconveniente.

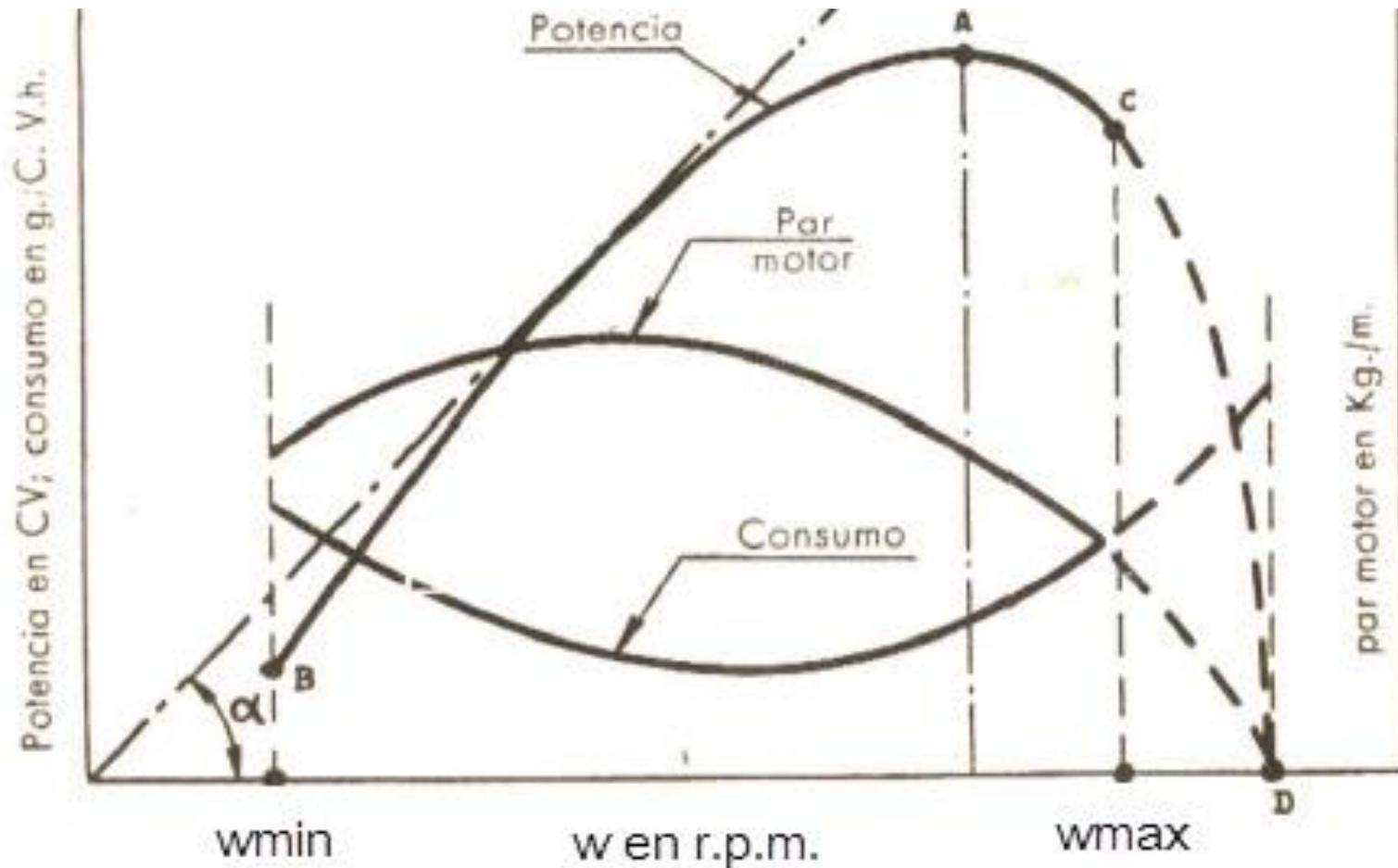
## □ Frenado por inversión de marcha

Los motores trifásicos asíncronos (*⇒ Fig.16*) se pueden frenar simplemente intercambiando las conexiones de dos devanados para invertir el sentido de giro del campo rotativo del motor.

El motor normalmente invierte su marcha si está parado. Si está girando, la inversión de fases provoca un frenado por contracorriente (ver el párrafo sobre el motor de anillos rozantes). El resto de sistemas de frenado descritos anteriormente pueden también ser usados.

La inversión de marcha de un motor monofásico es otra posibilidad si todos los devanados son accesibles.

# MOTOR ALTERNATIVO – CARACTERISTICA MECANICA



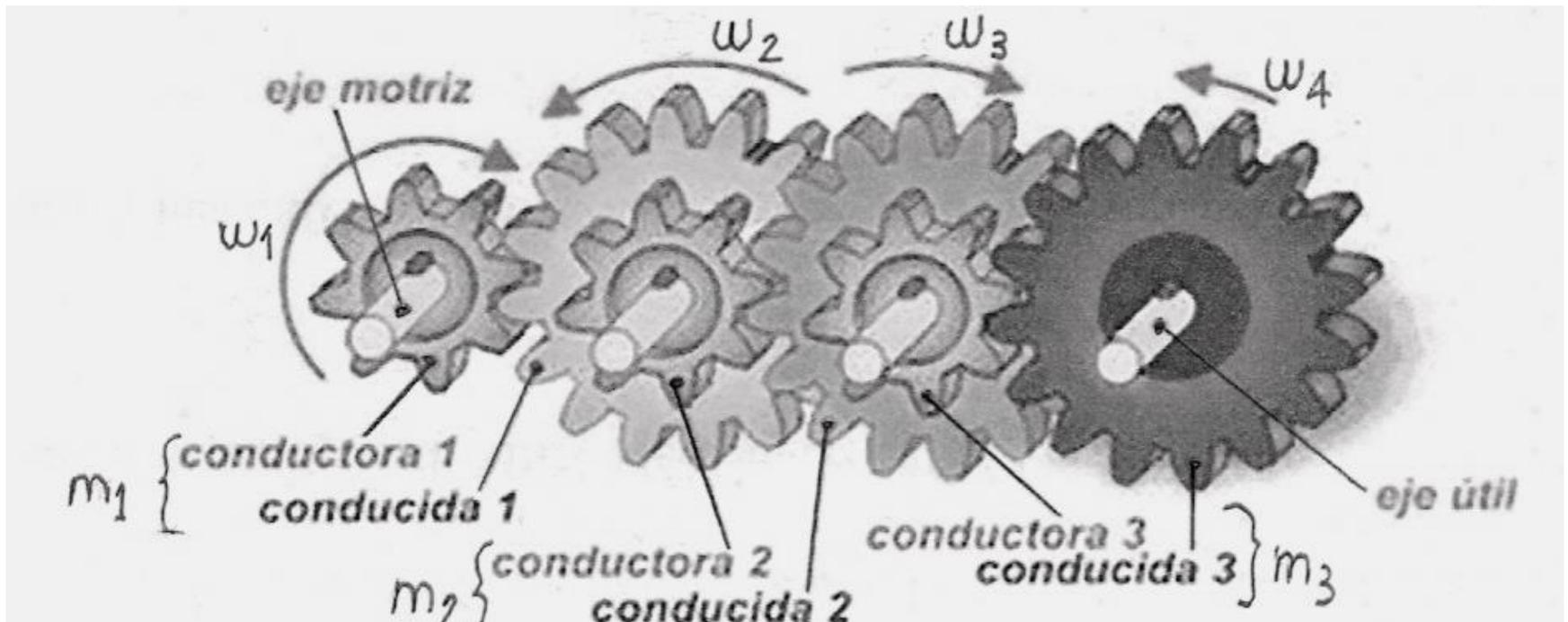
# Análisis de Transitorios en Máquinas

La segunda ley de Newton se expresa como:

$$F_{\text{mot}} - F_{\text{res}} = M \cdot A = M \cdot dv/dt$$

$$M_{\text{mot}} - M_{\text{res}} = J \cdot \alpha = J \cdot Dw/dt$$

# Análisis De Transitorios en Máquinas



$M_{mot} - M_{res} / m_t = 0$  en que  $m_t$  = relación transmisión total

- Siendo  $m_t = m_1 * m_2 * m_3 * \dots * m_i$  en que  $m_1 = w_1 / w_2$ ,  $m_2 = w_2 / w_3$ ,  $m_3 = w_3 / w_4$
- En el caso de cambios rápidos de velocidades y de Pares.
- $M_{mot} - M_{res} / m_t = J_e * dw_1/dt$

Con un modelo matemático adecuado de las funciones  $M_{mot}(t)$ ,  $M_{res}(t)$  y  $w_1(t)$  del eje (motor en este caso) se puede establecer la duración del transitorio o las aceleraciones (fuerzas de inercia) a que se ven sometidos los componentes de la transmisión.

Para la determinación del  $J_e$  de la transmisión se debe tener en cuenta que la energía cinética total del sistema en cualquier instante es única y debe ser la misma expresada a través del  $J_e$  “en el eje de referencia” que la expresada como la suma de las energías cinéticas de cada uno de los componentes de la transmisión en el mismo instante.

$$\frac{1}{2} * J_e * \omega_1^2 = \frac{1}{2} * J_{mot} * \omega_1^2 + \frac{1}{2} * J_2 * \omega_2^2 + \frac{1}{2} * J_3 * \omega_3^2 + \frac{1}{2} * J_4 * \omega_4^2 + \dots + \frac{1}{2} * J_i * \omega_i^2.$$

$$\text{Æ} \quad J_e = J_{mot} + J_2 * \omega_2^2 / \omega_1^2 + J_3 * \omega_3^2 / \omega_1^2 + J_4 * \omega_4^2 / \omega_1^2 + \dots + J_i * \omega_i^2 / \omega_1^2.$$

$$\text{En la que } \omega_2^2 / \omega_1^2 = 1 / m_1^2, \quad \omega_3^2 / \omega_1^2 = (\omega_3^2 / \omega_2^2) * (\omega_2^2 / \omega_1^2) = 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2,$$

$$\omega_4^2 / \omega_1^2 = (\omega_4^2 / \omega_3^2) * (\omega_3^2 / \omega_2^2) * (\omega_2^2 / \omega_1^2) = 1 / m_3^2 * 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2,$$

$$\omega_i^2 / \omega_1^2 = \omega_i^2 / \omega_{(i-1)}^2 * \dots * (\omega_4^2 / \omega_3^2) * (\omega_3^2 / \omega_2^2) * (\omega_2^2 / \omega_1^2) = 1 / m_i^2 * \dots * 1 / m_3^2 * 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2,$$

**Quedando finalmente:**

$$J_e = J_{mot} + J_2 * 1 / m_1^2 + J_3 * 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2 + J_4 * 1 / m_3^2 * 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2 + \dots + J_i * 1 / m_i^2 * \dots * 1 / m_3^2 * 1 / m_2^2 * 1 / m_1^2,$$

Es práctica usual de distintos fabricantes de motores informar en sus catálogos el dato  $G \cdot D^2$  del motor, es decir el producto de la masa del motor ( $G$ ) por el radio de inercia ( $D$ ) al cuadrado.

Resulta

$$G \cdot D^2 = 4 \cdot g \cdot J_m,$$

en que  $g$  es aceleración de gravedad y  $J_m$  es el momento de inercia del motor.

Es decisión del proyectista trabajar con los  $J$  del motor y el resto de la transmisión o los  $G \cdot D^2$  del motor y los restantes componentes de la transmisión.

# Resistencias Externas con Movimiento Lineal

$$F_m - F_{res} = M \cdot a$$

Resulta mas práctico trabajar con  $M_m - M_{res} = J \cdot dw/dt$

$$F_l \cdot v_l = M_{el} \cdot \omega_1$$

$\Leftrightarrow$

$$M_{el} = F_l \cdot v_l / \omega_1$$

$F_l$  es la fuerza “lineal” resistente

$v_l$  es la velocidad de desplazamiento de  $F_l$

$M_{el}$  : Es el momento equivalente resistente lineal a la fuerza real reducido al eje 1 de referencia.  $\omega_1$  es la velocidad de rotación de referencia referida al eje 1.

Este  $M_{el}$  aparece en la ecuación general sumando en el  $M_{res}$ .

# Transitorios en Movimiento Lineal

- Conociendo la energía cinética de un cuerpo en translación puede hacerse la equivalencia rotación- translación.

$$\frac{1}{2} * ml * vl^2 = \frac{1}{2} * Jel * w1^2. \quad \text{Æ} \quad Jel = ml * (vl / w1)^2.$$

ml : Masa de desplazamiento lineal

Jel : Momento de inercia equivalente a la masa lineal.

Se suma al Je del transitorio.

# Rototranslación

- Sucede en un número menor de situaciones.
- Se aplica el método de Superposición de Efectos, ya que es un sistema lineal
- Se tratan como una resistencia a la translación y uno a la rotación. La componente de rotación pasa a formar parte de  $M_{res}$  y la parte de Translación a un  $M_{el}$

# Transitorios en RotoTranslación

- Se debe cumplir la 2º ley de Newton en rototranslación

$$\sum F = m * a_g = m * dv_g / dt$$

$$\sum M_g = J_g * \alpha_g = J_g * dw_g / dt$$

Se determina:

$$J_{ert} = J_g * w_g^2 / w_1^2$$

Que se suma a los J de los elementos en rotación

$$J_{elrt} = m (v_g / w_1)^2$$

Que se suma a los componentes en Translación

# Mecanismo Biela- Manivela

- Una parte de la la masa de la biela asociado a la coliza ´ como movimiento ´nico lineal

$$m_{bm} = m_b * l_{bgc} / l_b$$

Una parte de la masa de la biela asociada a la manivela como movimiento ´nico de rotaci3n.

$$m_{bc} = m_b * l_{bgm} / l_b$$

En que  $m_{bm}$  = masa de la biela asociada a la manivela en la articulaci3n biela-manivela  $m_b$  = masa total de la biela

$l_{bgc}$  = distancia sobre (longitud de) la biela entre su centro de gravedad  $g$  y la articulaci3n de la biela con el cubo de coliza

$m_{bc}$  = masa de la biela asociada al cubo en la articulaci3n biela-cubo

$l_{bgm}$  = distancia sobre (longitud de) la biela entre su centro de gravedad  $g$  y la articulaci3n de la biela con la manivela.