

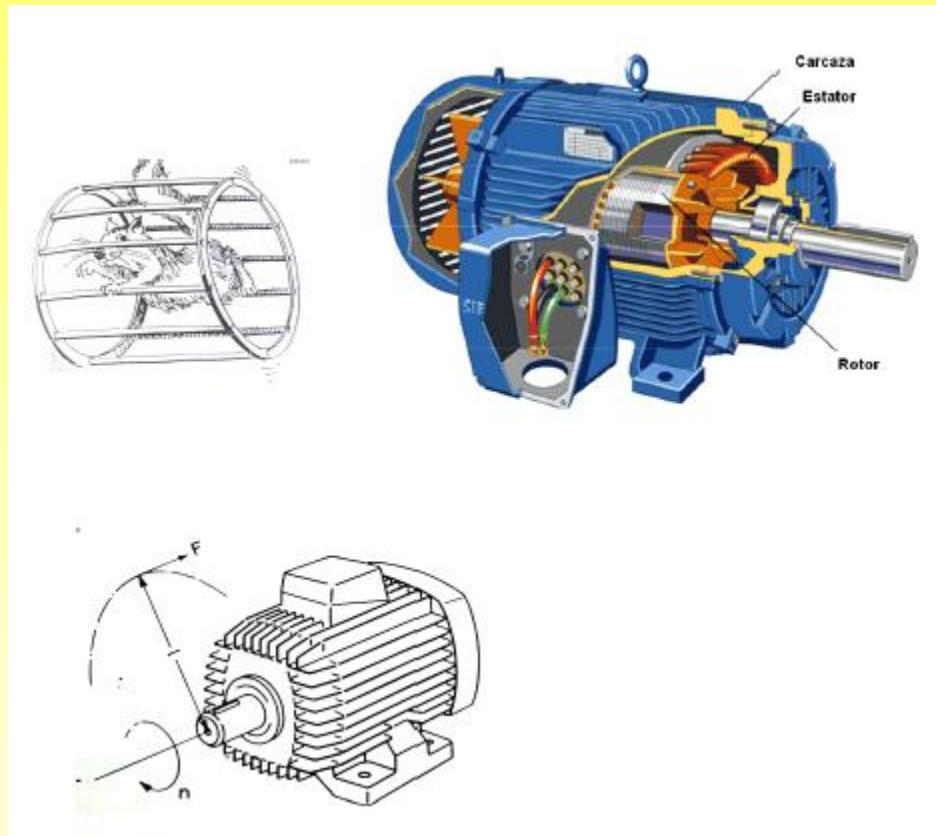
**F.C.E.F. y N. – DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
CÁTEDRA DE ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA



**Ing. Adrián Agüero
Prof. Titular**

INTRODUCCION



De acuerdo a la fuente de tensión que alimente al motor, podemos realizar la siguiente clasificación:

Motores de corriente directa (DC)

Motores de corriente alterna (AC):

- **El Motor Asíncrono o de Inducción**
- **Motor Síncrono: Imanes Permanentes
Reluctancia variable**

Motor de Corriente Directa (DC)

Resumen

- poder regular continuamente la velocidad del eje.
- un par de arranque elevado.

Es necesario aplicar corriente continua en el **inducido** (bobinado situado en el rotor) **y en el inductor** (bobinado o imán situado en el estator)

Rotor

(circuito de armadura o **inducido**)

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el par para mover a la carga.

Está formado por : **Eje, Núcleo y Devanado, Colector y Tapas**

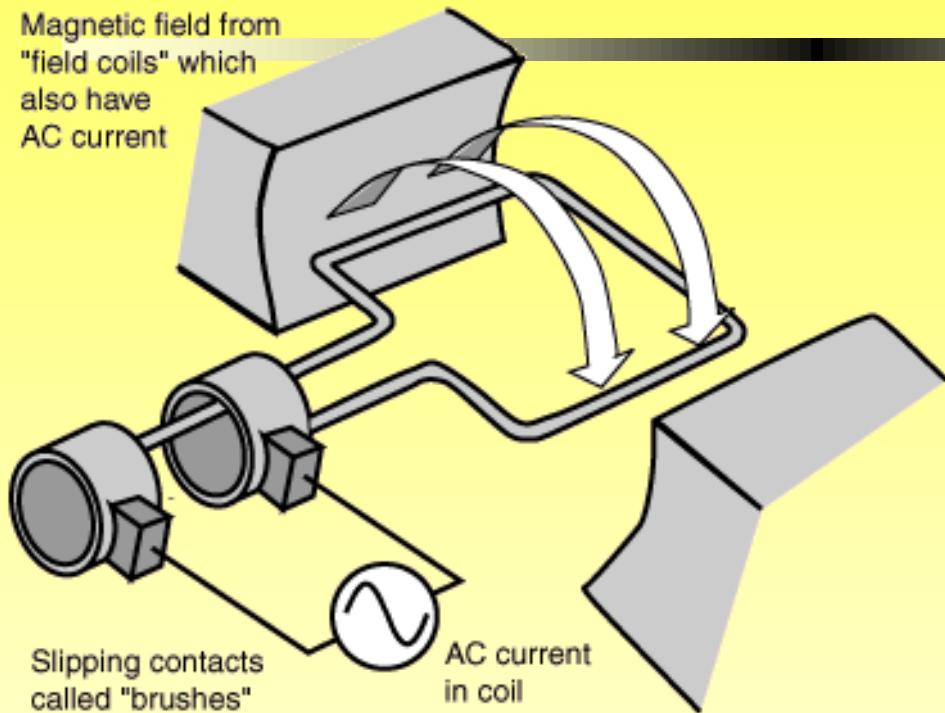
Estator

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio.

Está formado por **Armazón, Imán permanente, Escobillas y portaeescobillas**



Motor AC



Como ocurre en los motores DC, la corriente circula por la espira, genera un par en el bobinado. Dado que la corriente es alterna, **el motor girará suavemente a la frecuencia de la forma senoidal**, denominándose **MOTOR ASÍNCRONO**.

El más común es el **Motor de Inducción**, donde la corriente eléctrica es inducida en los bobinados del rotor, mas que alimentada directamente.

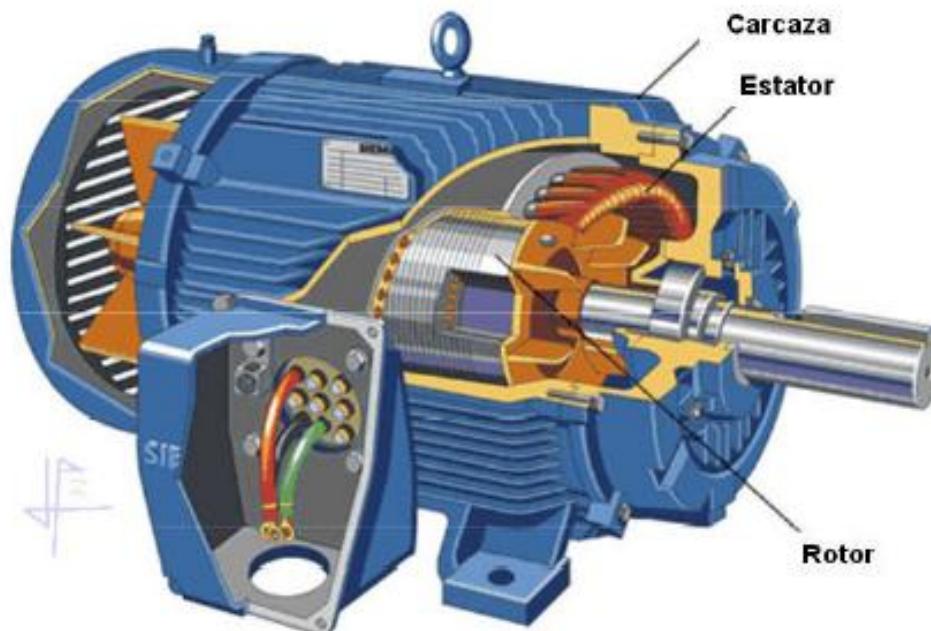
El campo magnético es producido por un electroimán accionado por el mismo voltaje de C.A. como en el rotor. Los bobinados que producen el campo magnético se llaman tradicionalmente los "**bobinados de campo**" mientras los bobinados y el rotor que gira se llaman la "**armadura**". En un motor de C.A. el campo magnético varía sinusoidalmente, tal y como la corriente varíe en el bobinado.

MOTOR ASÍNCRONO O DE INDUCCIÓN

- Alrededor del 65% de la energía eléctrica en EEUU es consumida por motores eléctricos.
- Considerando únicamente el sector industrial, alrededor del 75% es consumida por motores, siendo el 90% de ellos motores de inducción.

Como toda maquina eléctrica, los motores asíncronos constan de dos partes fundamentales y distintas:

- **El estator.**- Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fijada una corona de chapas de acero al silicio provistas de unas ranuras. Los bobinados de sección apropiada están dispuestos en dichas ranuras formando las bobinas que se dispondrán en tantos circuitos como fases tenga la red a la que se conectarán la máquina.
- **El rotor.**- Es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y consiste en un núcleo de chapas de acero al silicio apiladas que forman un cilindro, en el interior del cual se dispone un bobinado eléctrico. Los tipos más utilizados son
 - Rotor de jaula de ardilla
 - Rotor bobinado.



Si se distribuye espacialmente alrededor del estator de un motor los bobinados de un sistema de tensiones trifásicas decaladas 120° se genera un campo magnético giratorio.

La velocidad de giro de este campo magnético, denominada velocidad de sincronismo, viene dada por la expresión:

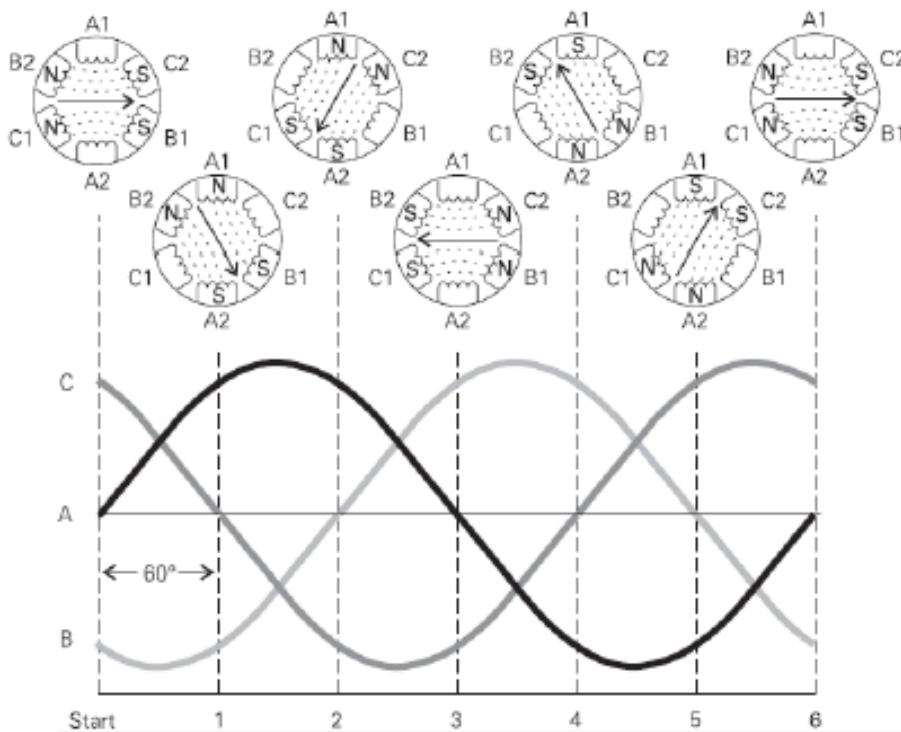
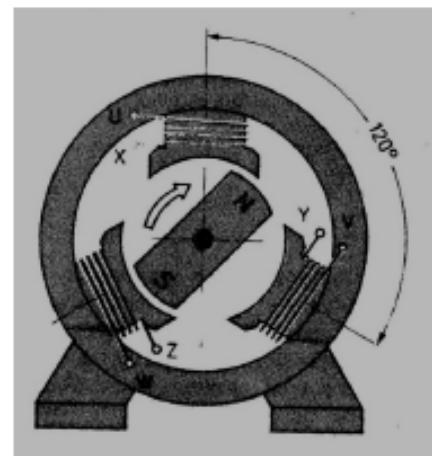
$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

de donde:

n = Velocidad de giro del campo magnético en r.p.m

f = Frecuencia de la corriente eléctrica de alimentación de la máquina

p = Número de pares de polos magnéticos establecidos en el bobinado del estator



Campo magnético giratorio creado por una corriente alterna trifásica

De este modo tendremos que las velocidades de sincronismo normalizadas en nuestro país para las máquinas eléctricas serían:

Nº pares de polos	r.p.m. del campo magnético
p=2	n=3000 r.p.m
p=4	n=1500 r.p.m
p=6	n=500 r.p.m
.	.

En los motores eléctricos, la velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la velocidad de giro del campo magnético del estator, debido a la fricción del rotor en los cojinetes, rozamiento con el aire y a la carga acoplada al eje del rotor, por tal motivo se les conoce a estos motores con el nombre de **motores asíncronos**

Tal y como se acaba de indicar, la velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo, a ésta diferencia se le da el nombre de **deslizamiento** que se expresa generalmente en tanto por ciento, referido a la velocidad de sincronismo. Se designa por la letra "s", y viene dado por la expresión:

Deslizamiento absoluto

$$s = n_1 - n_2$$

Deslizamiento relativo

$$s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$$

de donde

s = deslizamiento, n₁ = velocidad de sincronismo, n₂ = velocidad de giro del rotor

La frecuencia a que están sometidos los conductores del rotor es $f_r = s \cdot f$ (f = frecuencia en Hz de la red eléctrica de alimentación al motor)

Principio de Funcionamiento del Motor Asíncrono

Campo magnético giratorio en el estator
veloc. giro →

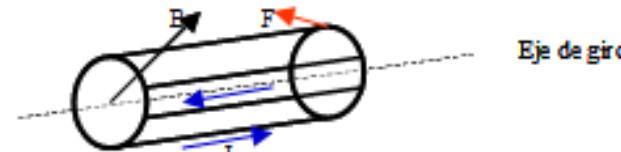
$$N_s = \frac{f}{P} \cdot 60$$

← Teorema Ferraris

El campo magnético induce f. e. m. en el rotor

Faraday ↗

$$e = \int (v \times B) \cdot dI = (v \times B) \cdot L$$



Eje de giro

Circulan corrientes por el rotor

Corrientes y fuerzas inducidas en la jaula

Fuerzas electromagnéticas
entre las corrientes del rotor y el campo magnético del estator

Laplace ↗

$$F = i \cdot (L \times B)$$

Par en el rotor: el rotor gira



El rotor gira a una velocidad N_r , inferior a la velocidad de sincronismo N_s
pues en caso contrario no se induciría f. e. m. en el rotor
y por lo tanto no habría par motor

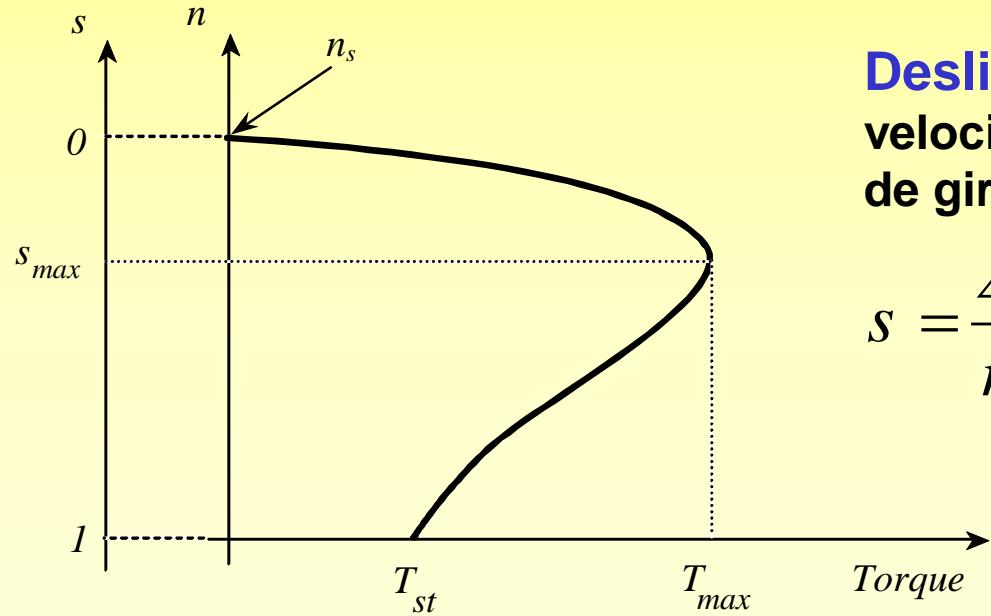
¿Cuál es la velocidad del motor?

$$\Delta n = n_s - n = f(T_{load})$$

Velocidad del flujo en el entrehierro

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{pp} = 120 \frac{f}{p} \quad rev/min$$

Velocidad mecánica



Deslizamiento: diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad de giro

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{\Delta \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

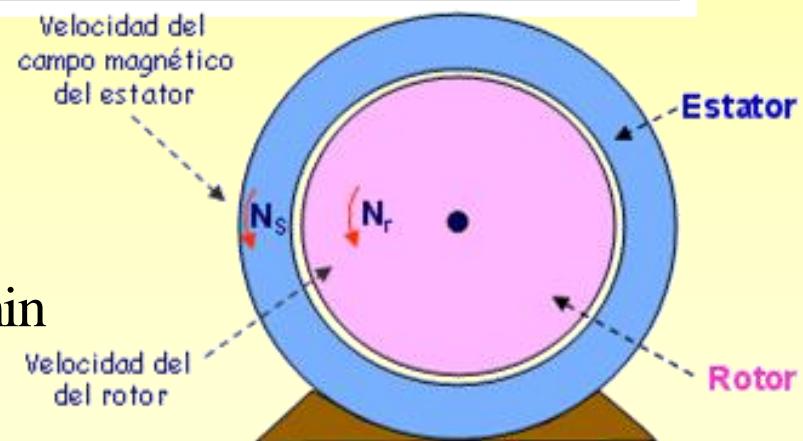
¿Cuál es la velocidad del motor?

$$n_s = \frac{60f}{pp} = 120 \frac{f}{p} \quad rev/min$$

Número de polos	Velocidad de rotación en rpm		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	450	750

La velocidad del motor para máxima carga es

$$n = n_s \cdot (1-s) = 120 \cdot \frac{f}{p} \cdot (1-s) = \quad rev/min$$

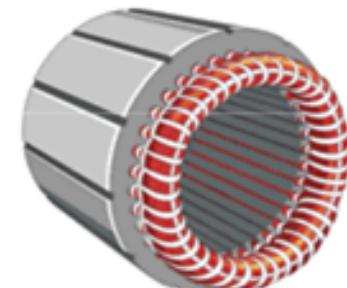


Motor Asíncrono o de Inducción:

Estator

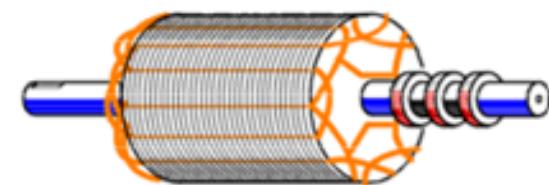
Devanado trifásico distribuido en ranuras a 120°

Tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados $2\pi/(3P)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina.



Bobinado

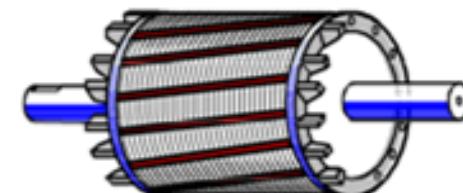
Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene porqué ser el mismo que el del estator, lo que sí tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.



Rotor

Jaula de ardilla

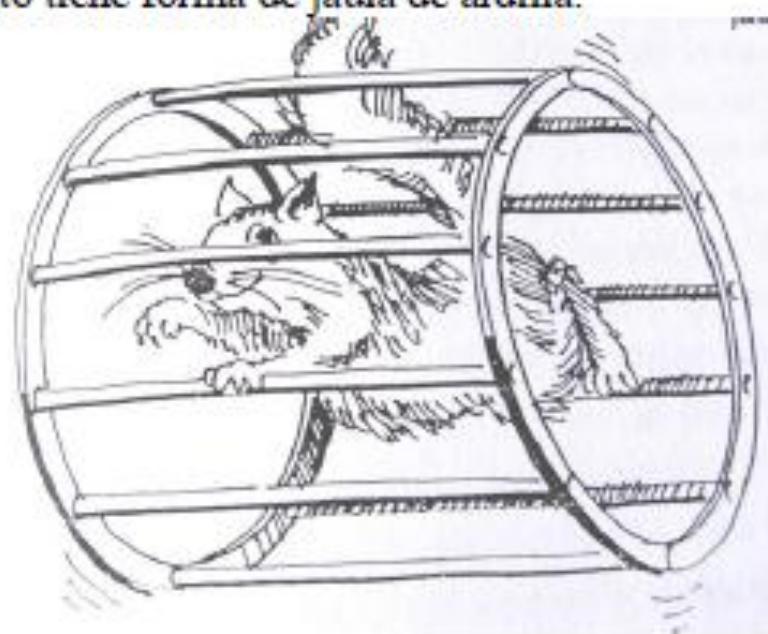
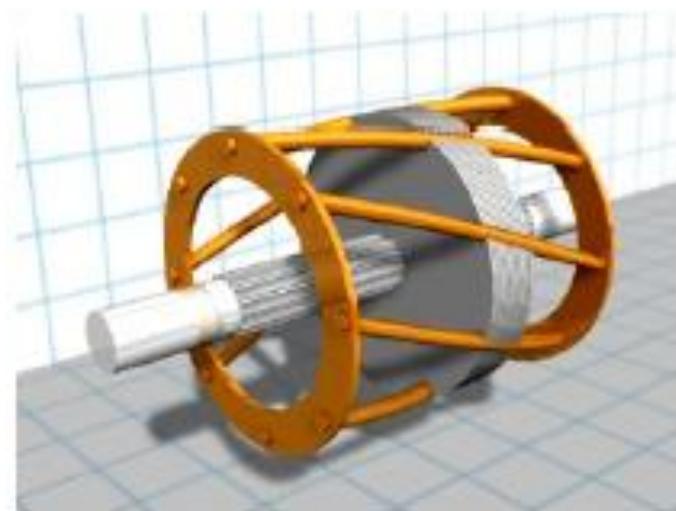
Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuye los ruidos

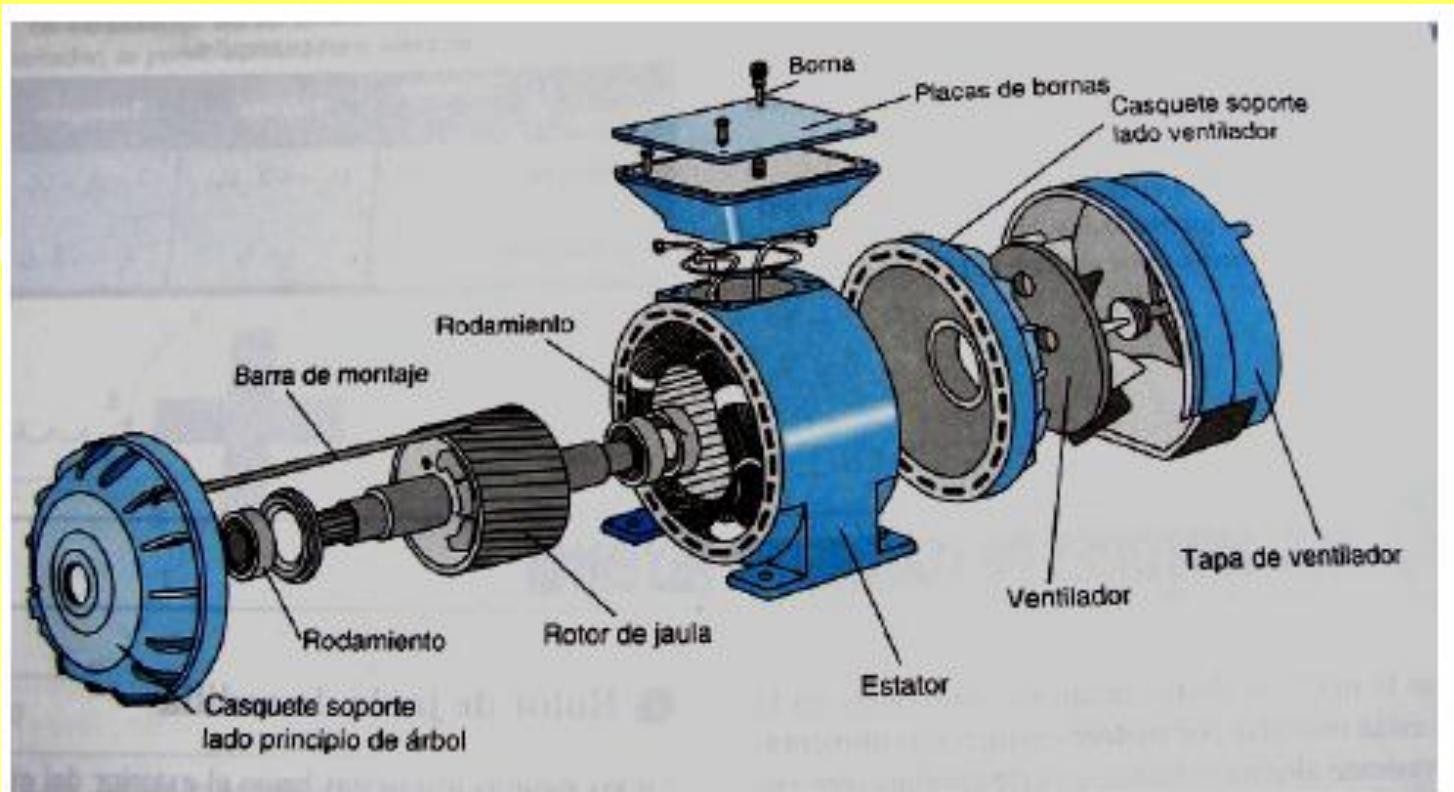


2. MOTORES DE ROTOR DE JAULA DE ARDILLA

El motor de rotor de jaula de ardilla, también llamado de rotor en cortocircuito, es el más sencillo y el más utilizado actualmente. En núcleo del rotor esta construido de chapas estampadas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras, generalmente de aluminio moldeado a presión.

Las barras del devanado van conectadas a unos anillos conductores denominados anillos extremos. El bobinado así dispuesto tiene forma de jaula de ardilla.





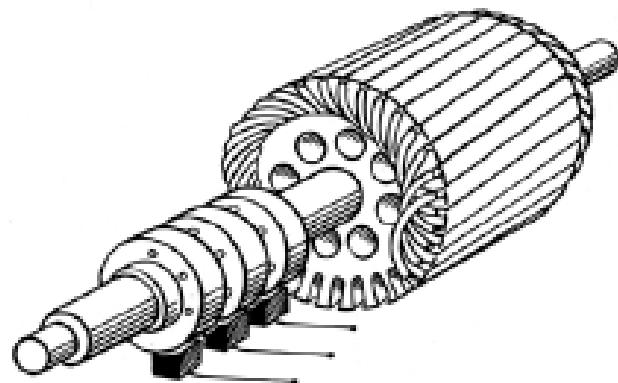
Las ranuras del rotor y suelen hacerse oblicuas respecto al eje para evitar así puntos muertos en la inducción electromagnética.

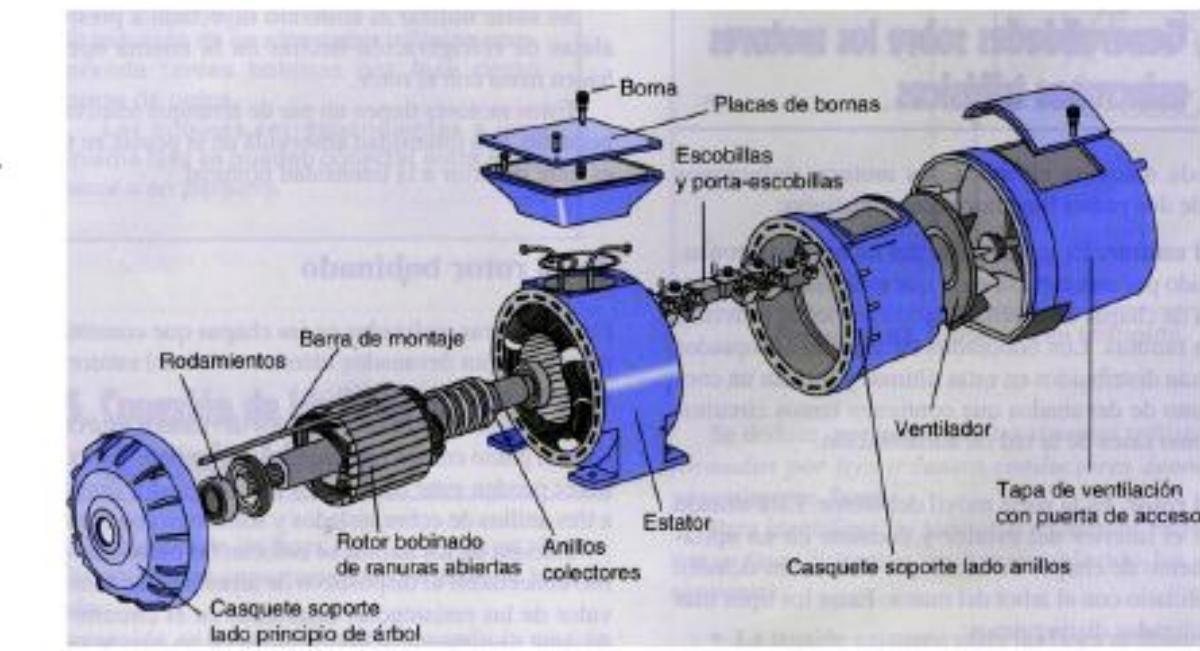
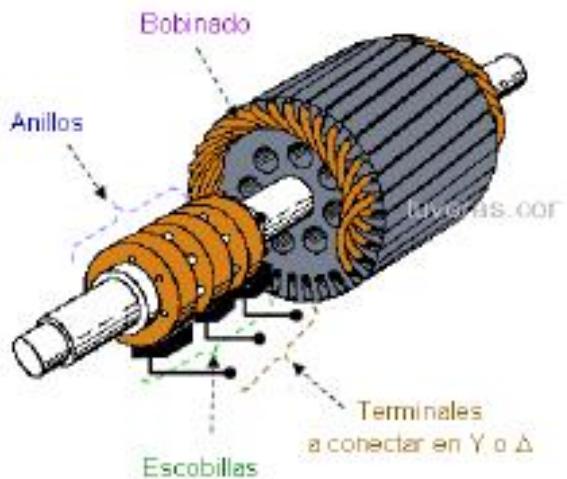


Un inconveniente de los motores con rotor de jaula de ardilla es que en el arranque absorbe una corriente muy intensa (de 4 a 7 veces la nominal o asignada), y lo hace además con un bajo factor de potencia, y a pesar de ello, el par de arranque suele ser bajo.

3. MOTORES DE ROTOR DE ANILLOS ROZANTES

Son motores asincronos con un devanado trifásico de cobre dispuesto en las ranuras de rotor, que va conectado a tres anillos metálicos por uno de sus extremos, en tanto que, por el otro lado se conectan en estrella. De este modo se puede controlar desde el exterior la resistencia total del circuito rotórico, facilitando un control de la velocidad y corriente de arranque con un elevado par de arranque y un mejor factor de potencia que con el rotor en jaula de ardilla.





CONEXIÓN DE LOS BOBINADOS DE UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO

Es estator de un motor trifásico suele bobinarse con tres devanados distintos que se corresponden con cada una de las fases a las que habrá de conectarse en la red eléctrica.

Hasta hace tan sólo unos años la designación de las bobinas era la que se indica en la figura, por lo que es usual encontrar motores y textos escritos con esa denominación.

DENOMINACIÓN DE LOS TERMINALES OBSOLETA

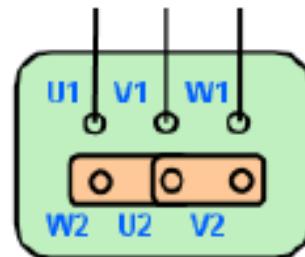
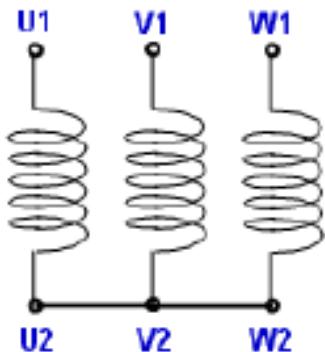


DENOMINACIÓN DE LOS TERMINALES ACTUAL

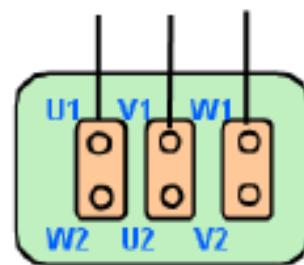
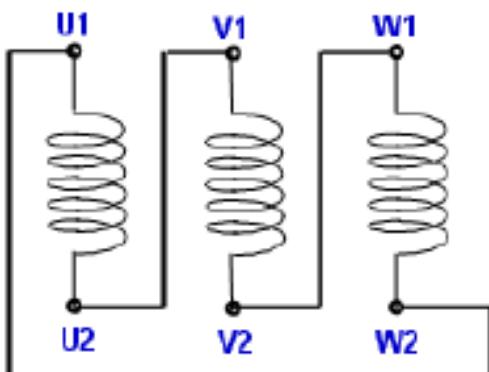


CONEXIÓN DE BOBINADOS

Conexión en Estrella

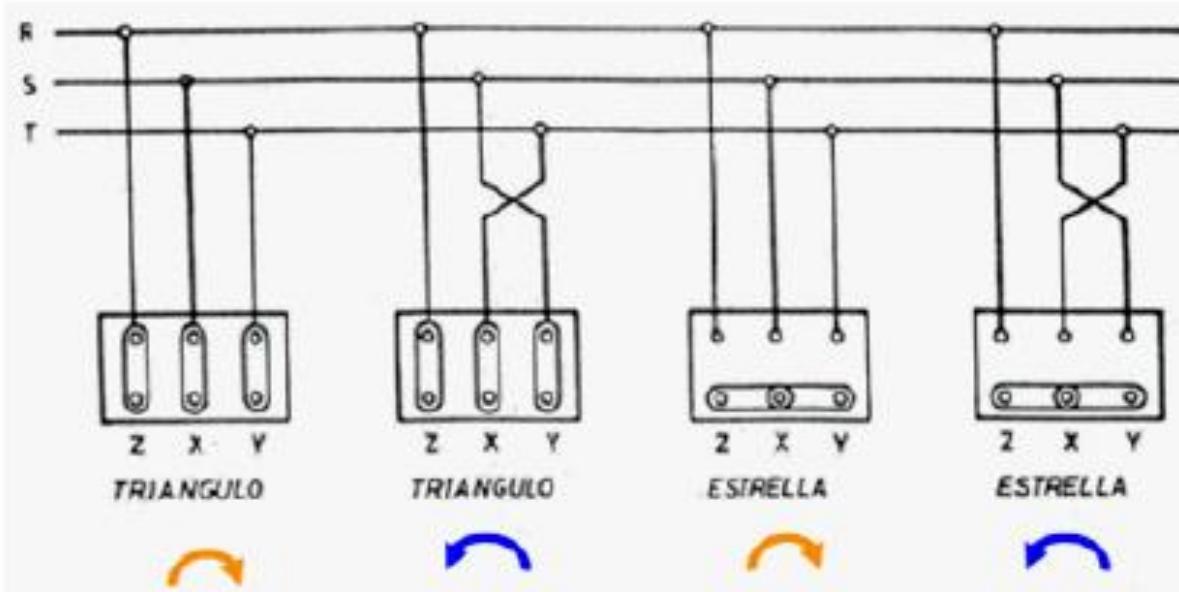


Conexión en Triángulo



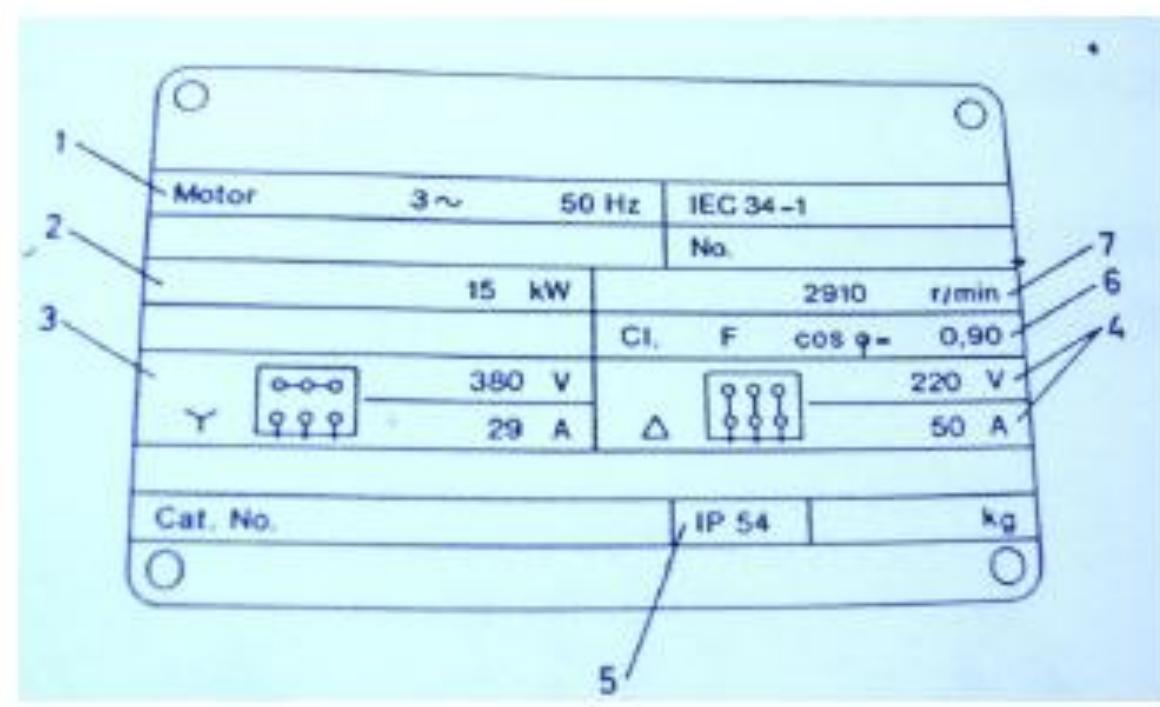
SENTIDO DE GIRO

Para cambiar el sentido de giro de un motor basta con intercambiar dos de las fases de alimentación.



5. PLACA DE CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR TRIFÁSICO

El dibujo de la siguiente figura representa un ejemplo de una placa de características que corresponde a un motor trifásico. Seguidamente se analiza en detalle los distintos datos y su significado.



1. Se trata de un motor trifásico de corriente alterna a 50 Hz
2. Potencia nominal o asignada en el eje del motor 15 kW. La potencia en CV de vapor será:

$$15 \text{ kW} * \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} * \frac{1 \text{ CV}}{736 \text{ W}} = 20 \text{ CV}$$

3. Los bobinados se pueden conectar en estrella hasta una tensión máxima de 380V, circulando en ese caso una corriente por cada línea de alimentación de 29A
4. En conexión triángulo la tensión compuesta entre las fases de alimentación podrá ser máximo de 220 V, en cuyo caso circulará por cada una de las líneas de alimentación 50 A
5. Indica el grado de protección de la carcasa del motor contra agentes externos, atendiendo a la clasificación establecida por la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), para el caso que nos ocupa:
 - a. IP54: Carcasa protegida a prueba de polvo y proyecciones de agua
 - b. IP55: Carcasa protegida a prueba de polvo y chorros de agua
6. Cl F nos indica la clase del motor en lo que se refiere a la máxima temperatura de funcionamiento y tipo de aislamiento, en este caso – clase F- nos indica que puede funcionar hasta una temperatura máxima de 155°C.

Por otro lado, el $\cos \varphi = 0,9$ es el factor de potencia, lo que nos permitirá hacer algunos cálculos básicos:

- a. Potencia activa absorbida de la red:

Obtendremos los mismos datos operando con los datos de conexión estrella o de triángulo. Supondremos que la tensión compuesta (entre fases) de la línea de alimentación es 380 V, por tanto:

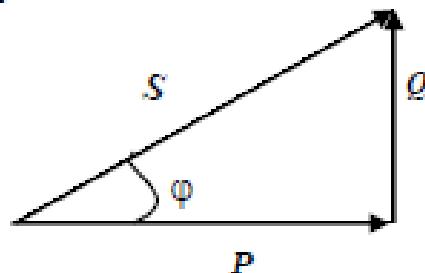
$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi = 1,732 * 380 * 29 * 0,9 = 17.178 \text{ W}$$

- b. Potencia reactiva de tipo inductivo absorbida:

$$\cos \varphi = 0,9 \Rightarrow \varphi = 25^\circ 50' 30,96'' \Rightarrow \operatorname{sen} \varphi = 0,436$$

$$Q = \sqrt{3} * V * I * \operatorname{sen} \varphi = 1,732 * 380 * 29 * 0,436 = 8322 \text{ VAr}$$

c. Considerando el triángulo de potencias, podemos averiguar la potencia aparente demandada:



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \cos \phi = \frac{P}{S} \quad \sin \phi = \frac{Q}{S} \quad \tan \phi = \frac{Q}{P}$$

$$S = \frac{17178}{0,9} = 19087 \text{ VA}$$

d. El rendimiento del motor lo podremos obtener de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\text{Potencia en el eje}}{\text{Potencia absorbida}} = \frac{15000}{17178} = 0,87$$

7. Velocidad del rotor con tensión, corrientes nominales en carga 2910 r.p.m.
8. Dado que la frecuencia es 50 Hz, el motor será de 2 polos, siendo su velocidad de sincronismo 3000 r.p.m. Con estos datos podemos calcular el deslizamiento $s = 3000 - 2910 = 90$ r.p.m. (típicamente en la práctica estos datos suelen variar un $\pm 10\%$ del valor dado por el fabricante). Si deseamos obtener el dato de deslizamiento relativo sería:

$$s\% = \frac{n_{\text{deslizamiento}}}{n_{\text{sincronismo}}} \times 100 = \frac{90}{3000} \times 100 = 3\%$$

Otros datos interesantes que podemos obtener son el par de salida y su relación con la velocidad y potencia del eje.

Sabemos por conceptos físicos que:

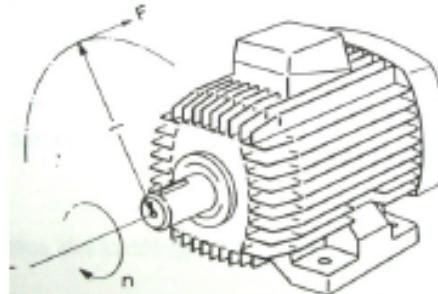
- La potencia es igual al trabajo entre el tiempo: $P = \frac{I}{t}$
- El trabajo es el producto de la fuerza por el espacio: $I = F \cdot e$
- La velocidad lineal es: $v = \frac{e}{t}$

Si operamos con las expresiones anteriores, obtenemos que la potencia se puede obtener como el producto de la fuerza por la velocidad lineal:

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{I}{t} \\ I = F \cdot e \end{array} \right\} P = \frac{F \cdot e}{t}$$
$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{F \cdot e}{t} \\ v = \frac{e}{t} \end{array} \right\} P = F \cdot v$$

Por otro lado, sabemos que:

- El momento o par ejercido por una fuerza es el producto de la fuerza por la distancia (longitud -l-) perpendicular al eje de giro: $M = F \cdot l$



- La expresión que relaciona la velocidad lineal con la angular viene dada por la fórmula: $v = \omega \cdot l$ donde l es el radio
- Operando con las expresiones anteriores tenemos:

$$\begin{aligned} P = F \cdot v &\Rightarrow F = \frac{P}{v} \\ M = F \cdot l &\Rightarrow F = \frac{M}{l} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{P}{v} = \frac{M}{l} ; \quad P = \frac{M \cdot v}{l} \\ v = \omega \cdot l \end{array} \right\} \quad P = \frac{M \cdot \omega \cdot l}{l} ; \quad P = M \cdot \omega$$

Pasando la velocidad angular de rd/s a r.p.m

$$1 \frac{\text{rd}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi \text{ rd}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ minuto}} = 9,55 \frac{\text{vueltas}}{\text{minuto}} = 9,55 \text{ r.p.m}$$

Obteniendo finalmente

$$P = \frac{M \cdot n}{9,55}$$

donde:

P = Potencia del motor en el eje en W

M = Momento o par desarrollado por el motor en N·m

n = Velocidad en r.p.m. del rotor

- El momento desarrollado por nuestro motor será por tanto:

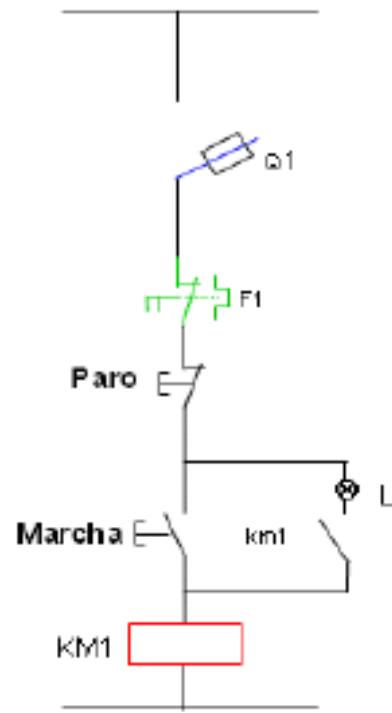
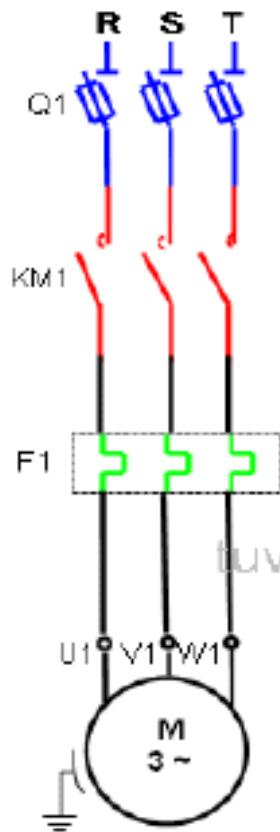
$$M = \frac{P \cdot 9,55}{n} = \frac{15000 \cdot 9,55}{2910} = 49,2 \text{ N.m}$$

6. SISTEMAS DE ARRANQUE DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS

6.1. MOTOR TRIFÁSICO EN ARRANQUE DIRECTO

Como se ha comentado anteriormente, los motores de cortocircuito suelen consumir en el arranque corrientes muy elevadas, que para el caso de potencias elevadas ($P > 10 \text{ kW}$) pueden provocar fluctuaciones en las redes eléctricas de distribución, de ahí que para el arranque de motores se utilizan distintos procedimientos para limitar la corriente absorbida en su puesta en marcha.

A título de ejemplo se incluye la siguiente figura donde se pueden distinguir los esquemas de fuerza y maniobra del arranque de un motor trifásico, así como sus elementos de mando y protección.



6.2. ARRANQUE ESTRELLA-TRIÁNGULO DE UN MOTOR TRIFÁSICO

Con independencia del arranque directo, el arrancador estrella-triángulo es el sistema de arranque más utilizado en los motores asincrónicos de inducción.

Consiste en arrancar el motor con conexión estrella a una tensión $\sqrt{3}$ veces inferior a la que soporta el motor para este tipo de conexión, transcurrido un cierto tiempo, cuando el momento desarrollado por el motor conectado en estrella M_1 iguale al momento de la carga (alrededor del 80% de la velocidad nominal) conmutar las conexiones de bobinas del motor a triángulo.

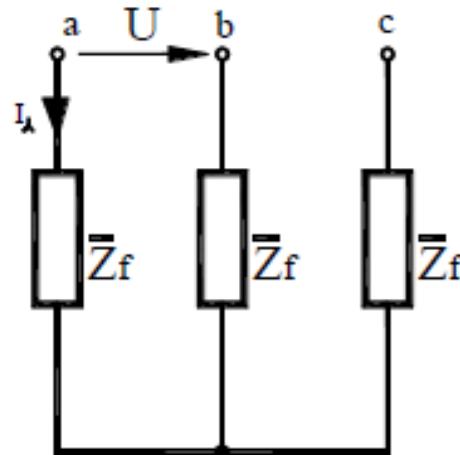
Explicación técnica.

Como se ha indicado anteriormente, el bobinado recibe una tensión $\sqrt{3}$ veces menor que la nominal o asignada a este tipo de conexión, por lo que el par y la intensidad absorbida se hace $\sqrt{3}$ veces menor.

Si tenemos en cuenta que en un sistema trifásico conectado en triángulo, la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la de fase y, en el sistema estrella las intensidades de línea es igual que la de fase, se llega a la conclusión que la corriente absorbida es también $\sqrt{3}$ menor en el arranque en estrella.

Si prueba así, que la reducción de $\sqrt{3}$ veces por la tensión y $\sqrt{3}$ por la intensidad, da como resultado una reducción de $\sqrt{3} * \sqrt{3} = 3$ veces la corriente absorbida en comparación con el arranque directo.

Esta explicación se puede demostrar matemáticamente del siguiente modo:



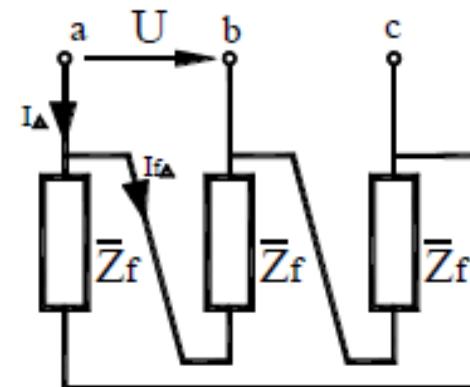
$$Z_f = \frac{U_{\Delta}}{I_{\Delta}}$$

$$U = \sqrt{3} * U_f$$

$$I_{\Delta} = I_f$$

Sustituyendo:

$$Z_f = \frac{U / \sqrt{3}}{I_{\Delta}}$$



$$Z_f = \frac{U_{\Delta}}{I_{\Delta}}$$

$$U = U_{\Delta}$$

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} * I_{\Delta}$$

Sustituyendo:

$$Z_f = \frac{U}{I_{\Delta} / \sqrt{3}}$$

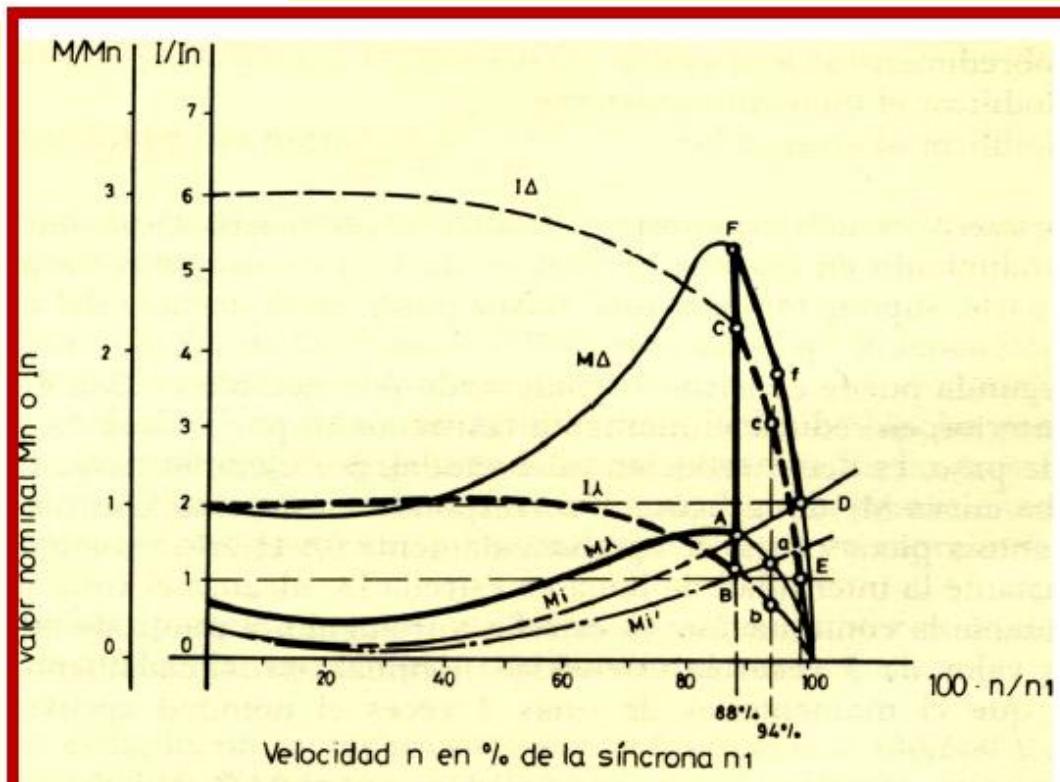
Como $Z_{f\Delta} = Z_{fA}$

$$\frac{U/\sqrt{3}}{I_\lambda} = \frac{U}{I_\Delta/\sqrt{3}} \Rightarrow I_\lambda = \frac{I_\Delta}{3}$$

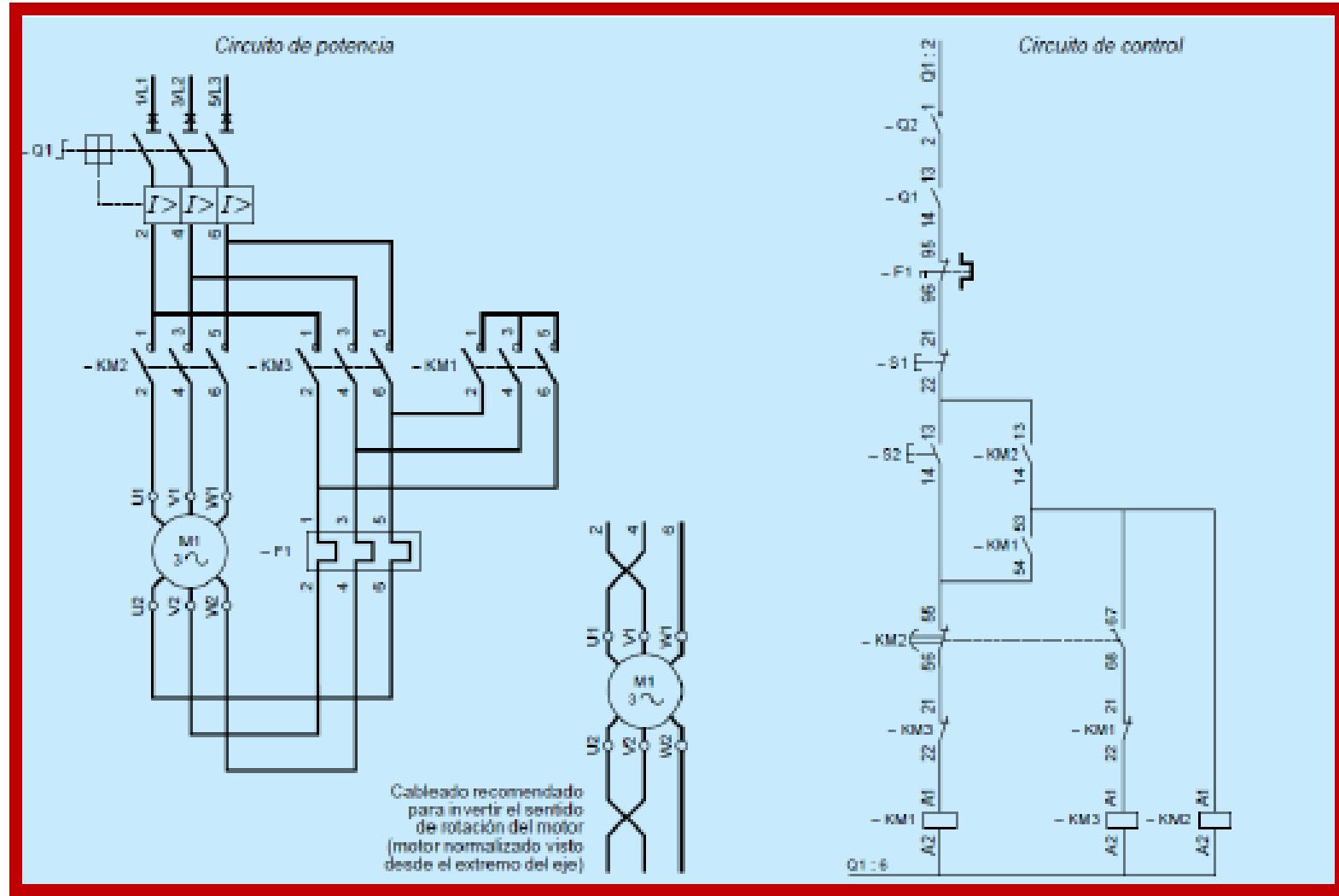
Por otro lado, la relación el momento del motor es proporcional a la tensión al cuadrado a que están sometidas las fases del mismo $M = k^* U_f^2$

$$\left. \begin{array}{l} M_\Delta = k^* U^2 \\ M_\lambda = k^* \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \end{array} \right\} \quad \frac{M_\lambda}{M_\Delta} = \frac{k^* \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2}{k^* U^2} \quad M_\lambda = \frac{1}{3} M_\Delta$$

En la siguiente gráfica se pueden apreciar las relaciones entre las corriente de arranque y los momentos en un sistema estrella-tríangulo, donde M_i es el momento resistente de la carga en unas condiciones particulares y M'_i en otras más favorables

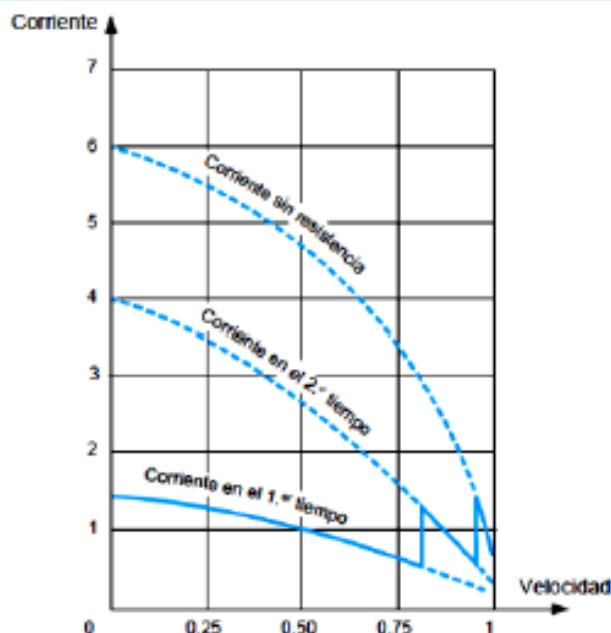


Los esquemas de la automatización del arranque mediante contactores de un arrancador estrella-tríangulo son los que se indican en la siguiente figura.

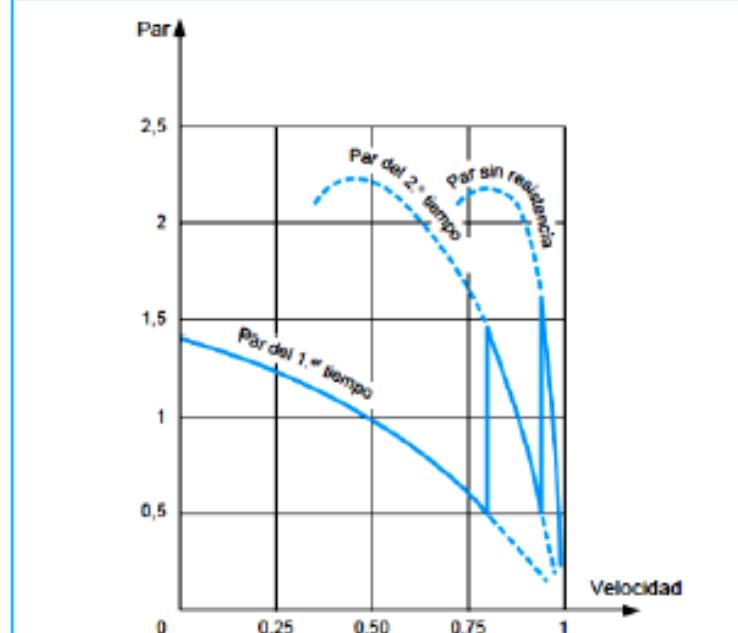


6.3. ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE ROTOR BOBINADO

Este tipo de arranque es aplicable a los motores de rotor bobinado con anillos rozantes. Gracias a estos anillos rotóricos es posible conectar resistencias en serie con las bobinas del rotor de forma que al elevarse su impedancia se disminuya la corriente absorbida en el arranque. A medida que el rotor va adquiriendo velocidad se va disminuyendo la resistencia mediante cortocircuito de las mismas.

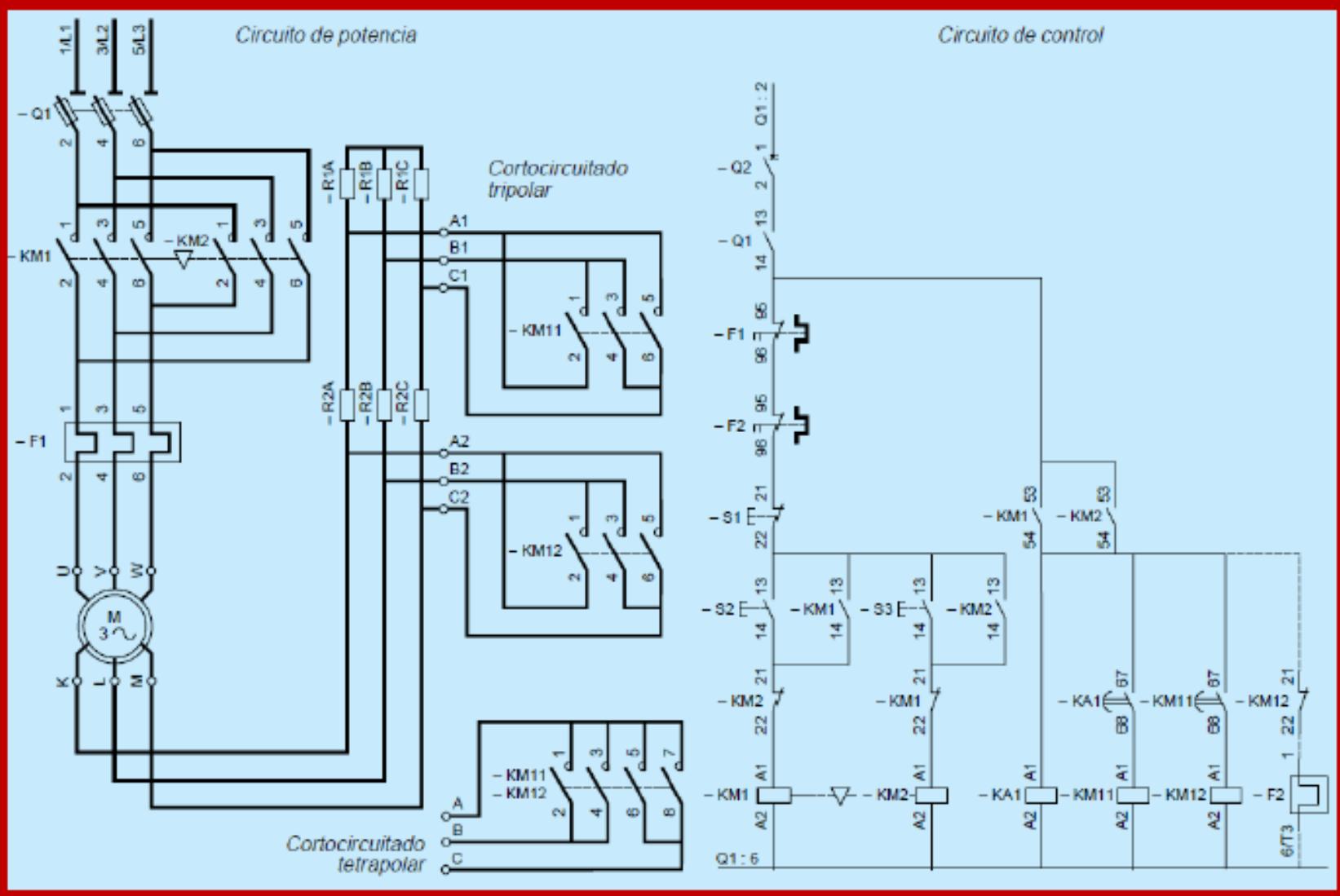


Curva de corriente/velocidad del arranque rotórico por resistencias



Curva de par/velocidad del arranque rotórico por resistencias

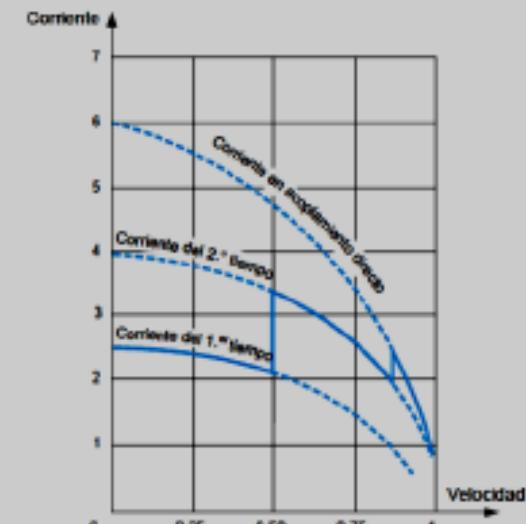
Curvas de corriente y par de arranque de un motor de anillos rozantes



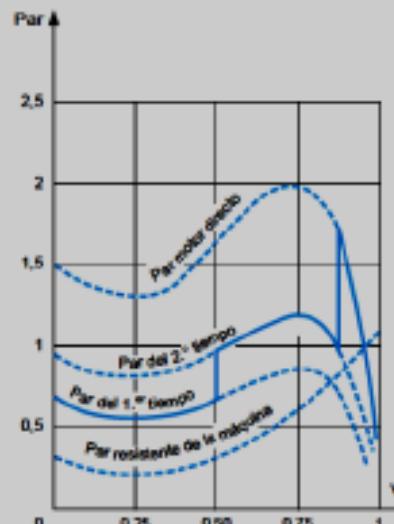
No obstante, este tipo de motor, no se emplea mucho debido a la posibilidad de avería y producción de arcos voltaicos y chispas en los anillos rozantes.

6.4. ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO POR AUTOTRANSFORMADOR.

Es un tipo de arranque poco frecuente puesto que suele emplearse en motores muy grandes $P > 100$ kW. Consiste en alimentar a tensión reducida al motor durante el proceso de arranque a través de un autotransformador hasta adquirir la velocidad nominal en que se desconecta el autotransformador del circuito.

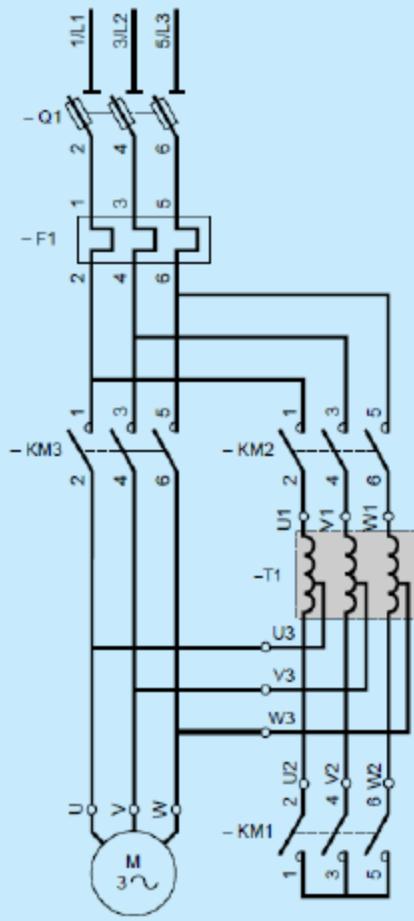


Curva de corriente/velocidad del arranque por autotransformador

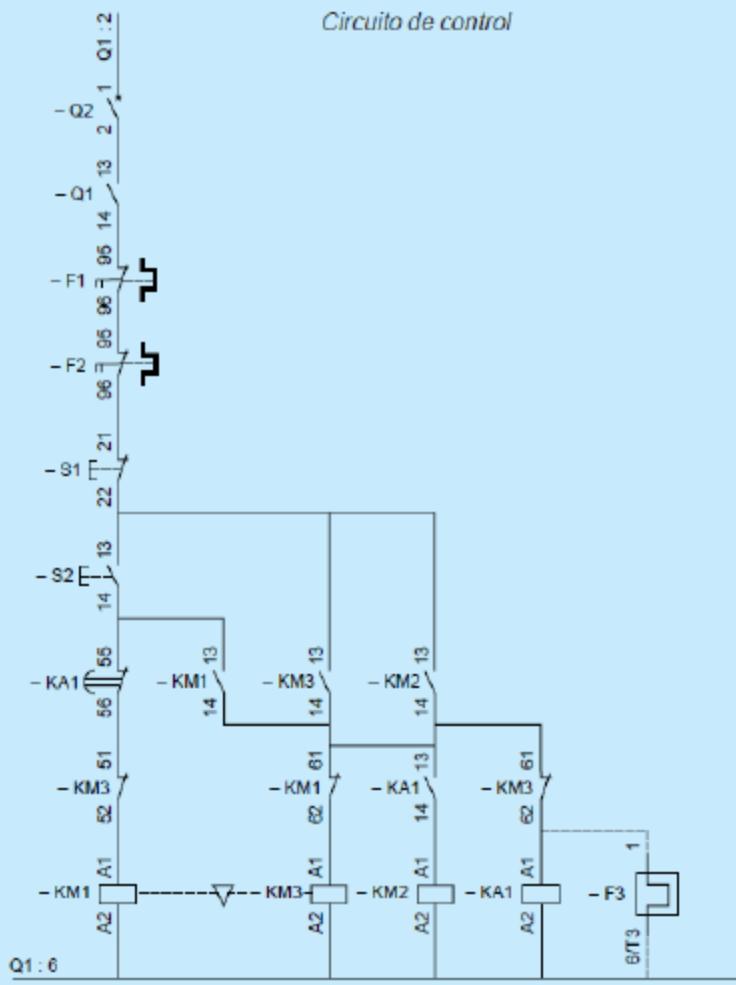


Curva de par/velocidad del arranque por autotransformador

Circuito de potencia

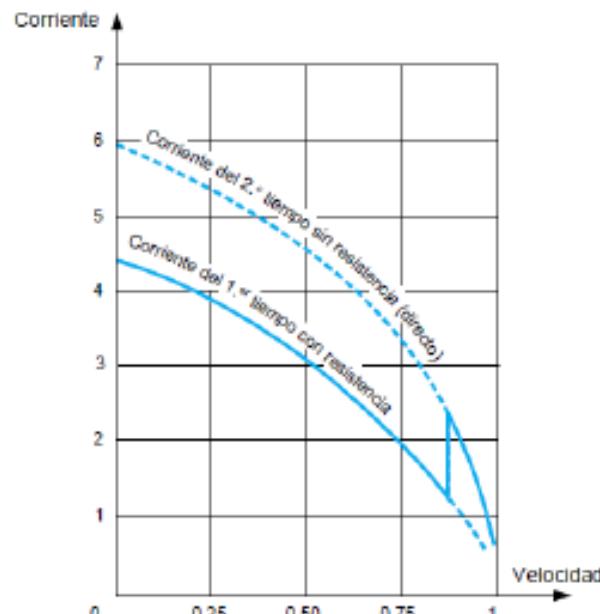


Circuito de control

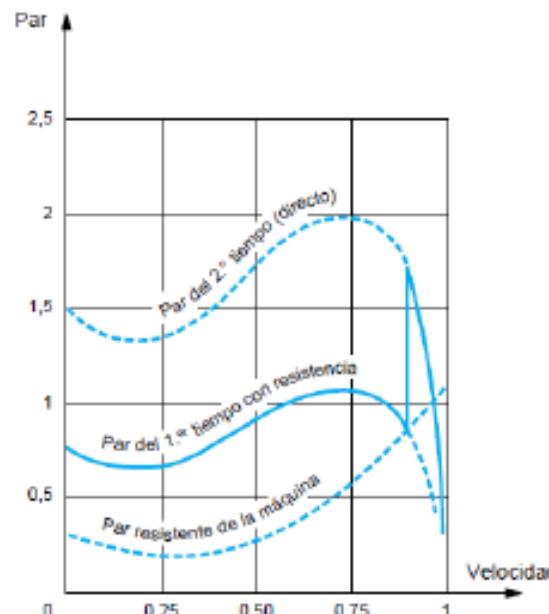


6.5. ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO POR RESISTENCIAS ESTATÓRICAS.

El principio consiste en arrancar el motor a una tensión reducida mediante la inserción en serie con las bobinas del estator unas resistencias. Una vez estabilizada la velocidad, se eliminan las resistencias y el motor se acopla directamente a la red de alimentación.

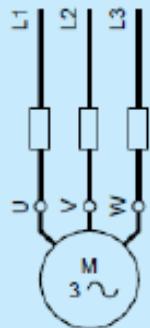


Curva de corriente/velocidad del arranque estatórico por resistencias

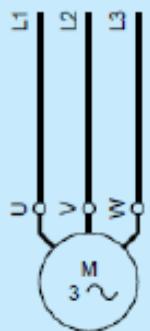


Curva de par/velocidad del arranque estatórico por resistencias

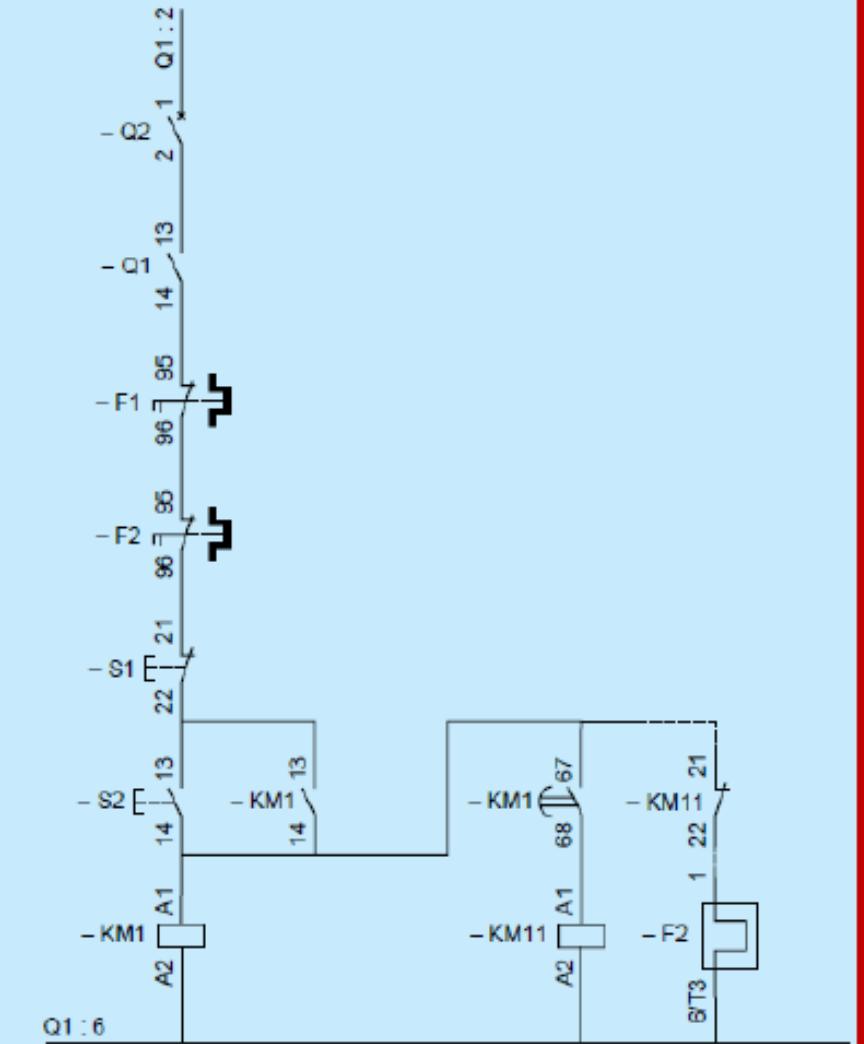
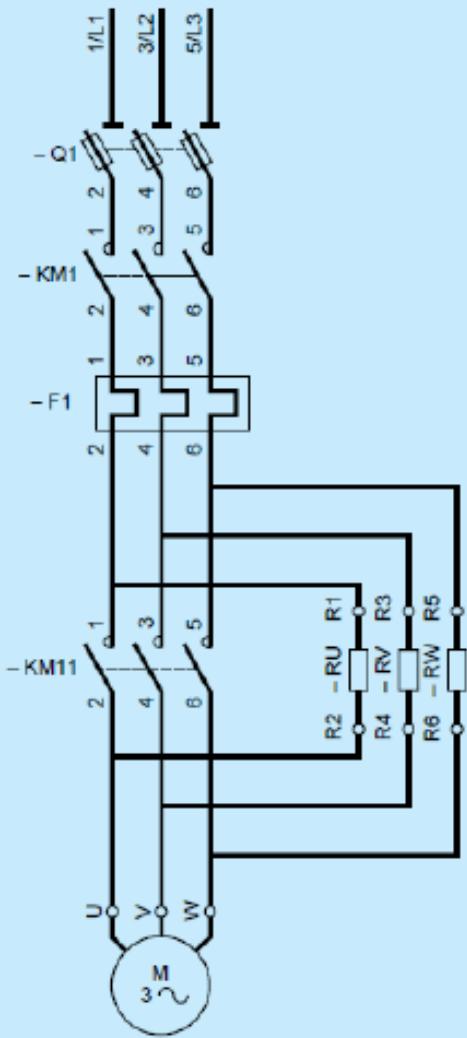
Dado que el par desarrollado por el motor es proporcional al cuadrado de la tensión, como la corriente durante el proceso de arranque disminuye el par se eleva también se eleva muy rápidamente y más deprisa de cómo lo hace en el sistema estrella-tríángulo (donde la tensión permanece constante en el proceso de arranque). Este tipo de arranque es apropiado para las máquinas cuyo par crece con la velocidad, como por ejemplo los ventiladores.



1.º tiempo



2.º tiempo



7. CONTROL DE VELOCIDAD EN LOS MOTORES ASÍNCRONOS.

Uno de los grandes problemas de los motores de inducción, frente a los de corriente continua, es su mala regulación de velocidad, aunque en la actualidad este problema ha sido resuelto gracias a los variadores electrónicos de velocidad.

Como sabemos la velocidad de rotor de un motor asíncrono se puede expresar:

$$s\% = \frac{n_1 - n_r}{n_1} ; \quad n_r = (1 - s\%) * n_1 = (1 - s\%) * \frac{60 * f}{p}$$

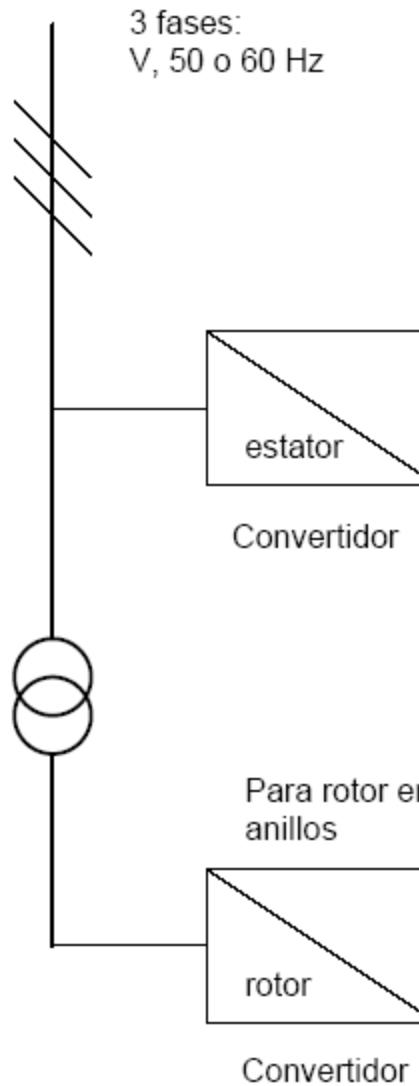
n_1 =Velocidad de sincronismo r.p.m ; n_r =velocidad de rotor r.p.m ; $s\%$ deslizamiento en %
 p =Nº de pares de polos de la máquina; f =frecuencia de la red eléctrica en Hz

Lo que significa que se puede regular la velocidad de un motor asíncrono de inducción variando:

- El numero de polos de la máquina
- La frecuencia de la red eléctrica de alimentación
- El deslizamiento

Variación de velocidad, motor asíncronos o de inducción

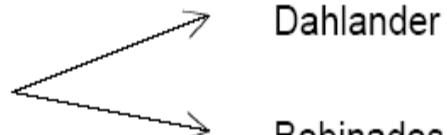
$$\omega_M = \omega_1 (1 - s) = 2\pi f_1 \frac{(1 - s)}{p}$$



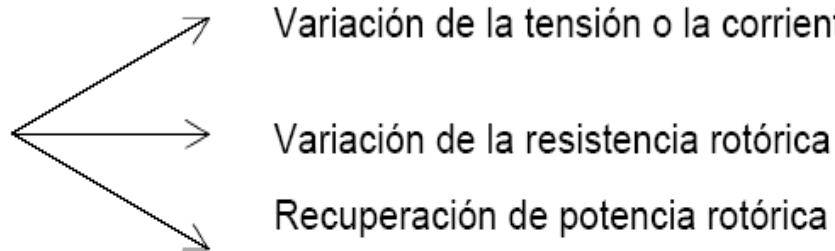
$$N_M = \frac{f(1 - s)}{p}$$



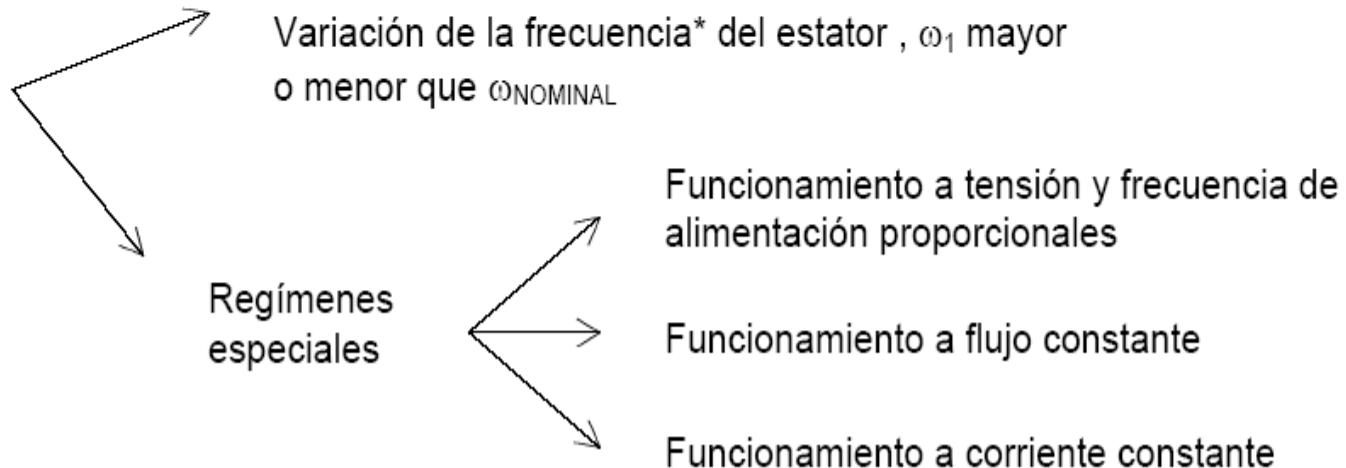
Cambio de polos, p



Variación del deslizamiento, s



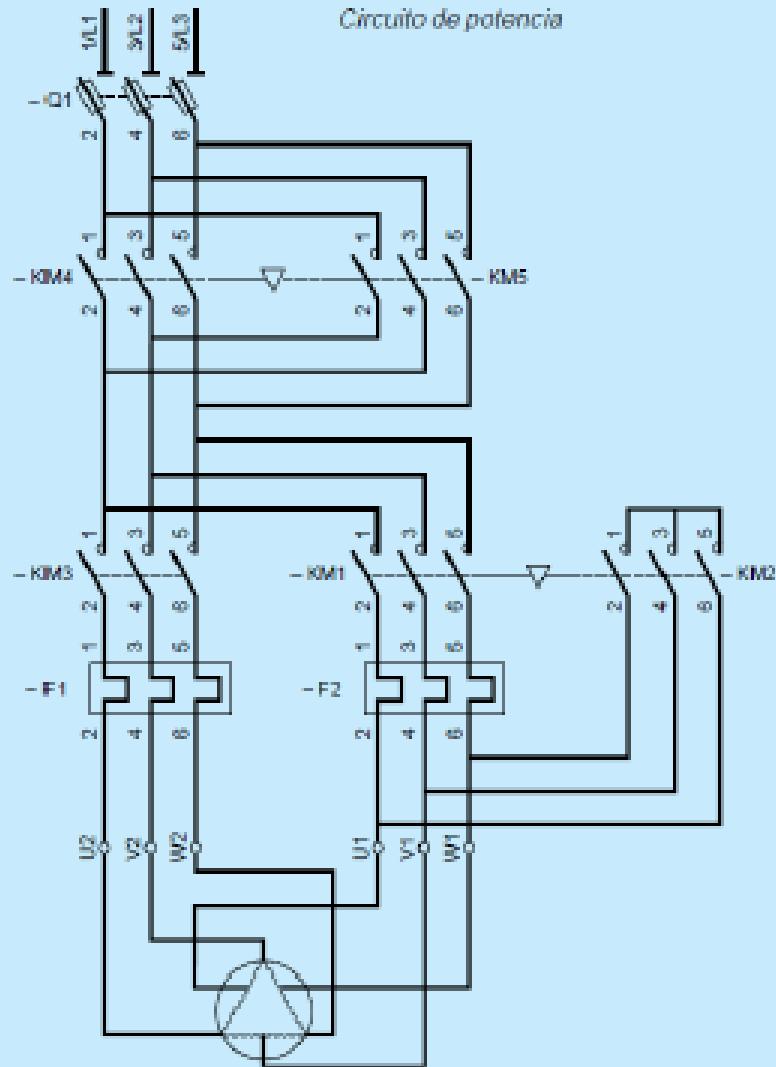
Variación de la frecuencia del estator, f_1



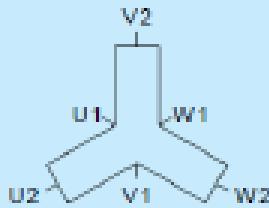
7.1. CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DEL NÚMERO DE POLOS DE LA MÁQUINA.

Observando la fórmula anterior se puede apreciar que variando en número de pares de polos del motor es posible variar la velocidad de sincronismo. En la práctica para variar el número de polos del motor se suele disponer distintos bobinados en el estator del motor y conectando uno u otro conseguiremos variar la velocidad. Existe, no obstante, un tipo de conexión especial denominada conexión Dahlander que mediante un único bobinado se consiguen dos velocidades de relación 1:2 mediante el cambio de conexiones del bobinado.

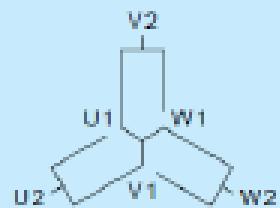
Este tipo de control sólo se suele emplear en los motores de rotor de jaula de ardilla dado que el cambio de polos del estator ha de llevar unido el cambio de polos del rotor, por lo que en los motores de rotor bobinado complicaría llevarlo a la práctica en condiciones económicamente rentables.



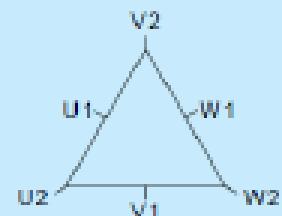
Acoplamientos



Par constante



Par variable

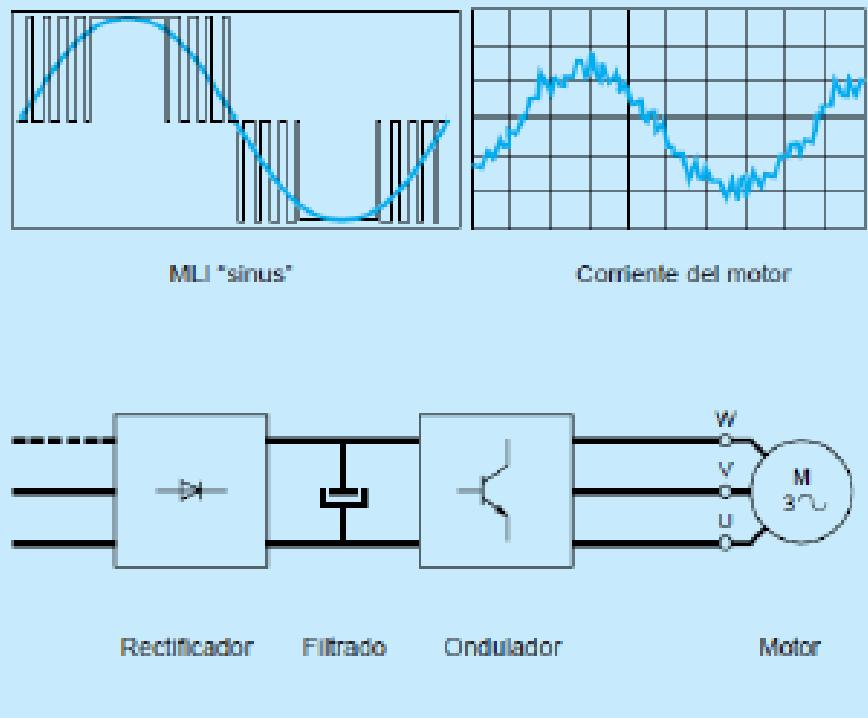


Potencia constante

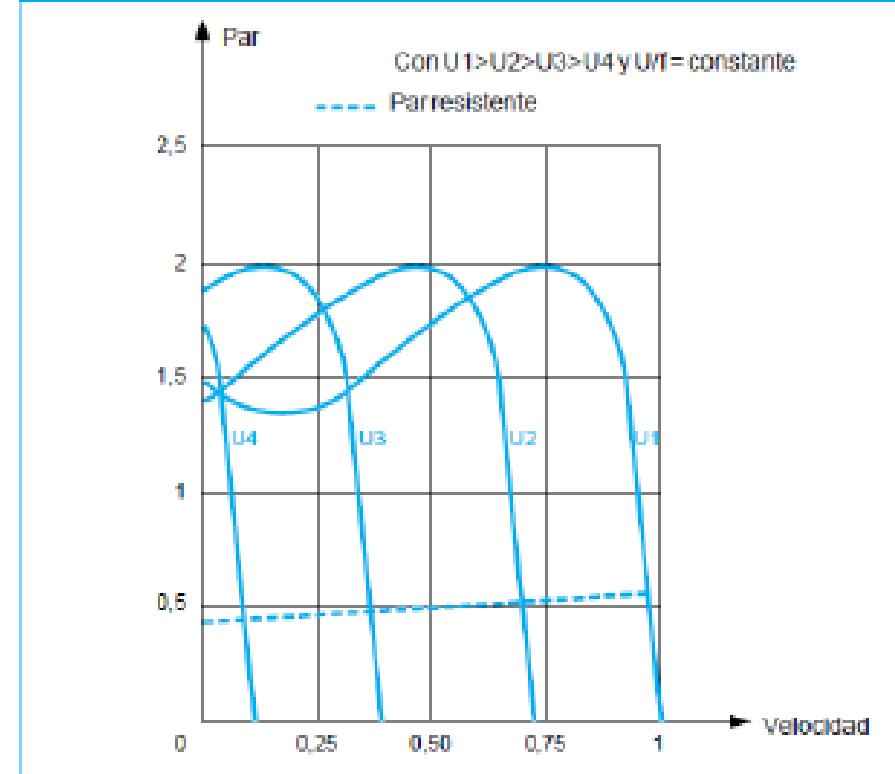
CONTROL DE VELOCIDAD POR CAMBIO DE FRECUENCIA

En la actualidad el empleo de sistemas de arranque mediante el control por contactores está quedando en desuso a favor de los arrancadores-variadores de velocidad electrónicos (convertidores de frecuencia).

Este tipo de dispositivos suministran una tensión alterna cuyo valor es regulable, al tiempo que también es posible regular la frecuencia de alimentación al motor, de este modo es posible conseguir un control de velocidad muy efectivo, que permite incluso llevar un motor a una velocidad de sincronismo superior a la nominal o asignada (práctica no recomendable). La razón de variar a la vez frecuencia y tensión radica en el hecho de conseguir un par constante en todo el régimen de velocidades del motor.



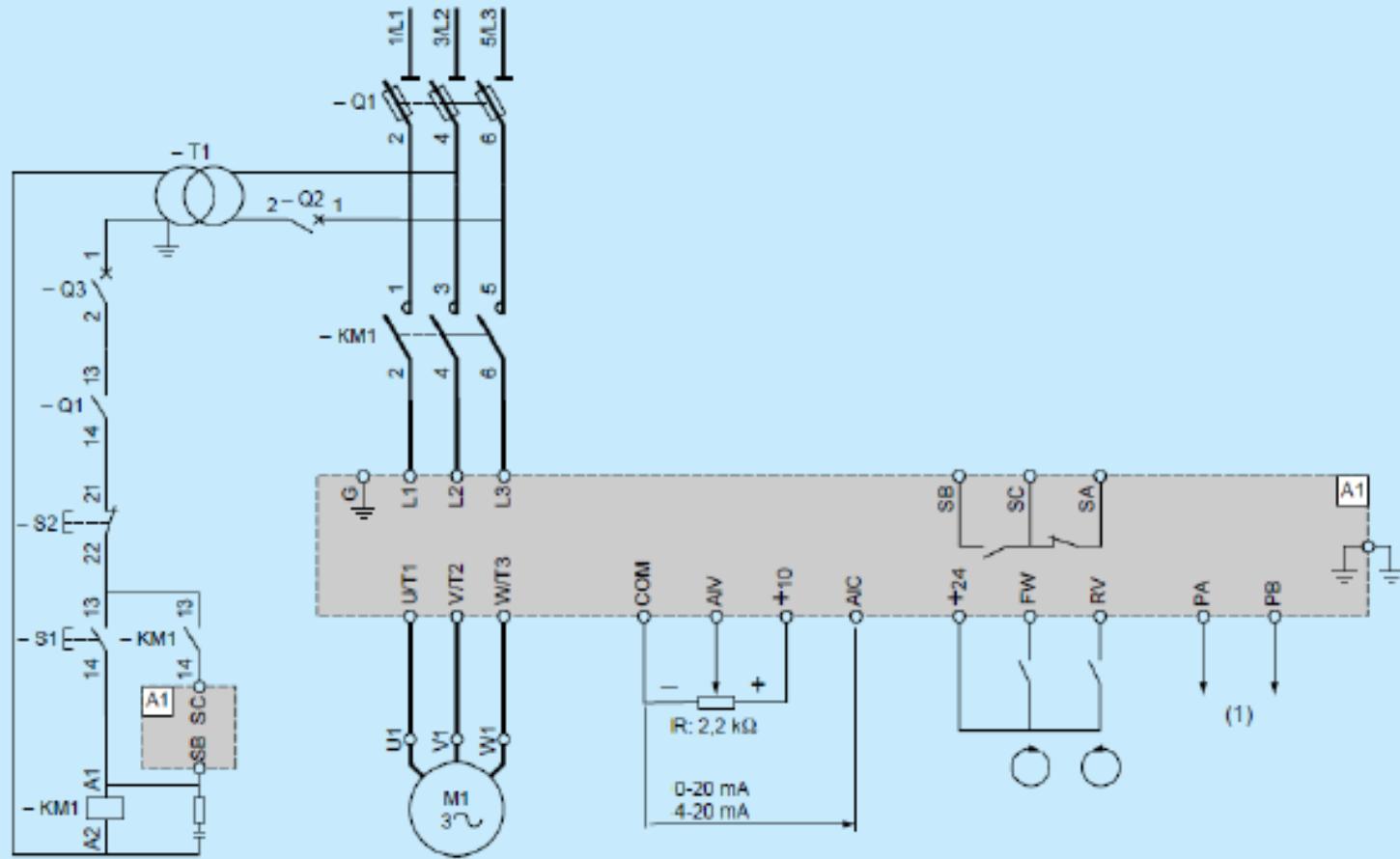
Esquema de base de un convertidor de frecuencia



Curva de par/velocidad del arranque con convertidor de frecuencia

Esquema de conexión de un convertidor de frecuencia.

Circuitos de potencia y de control

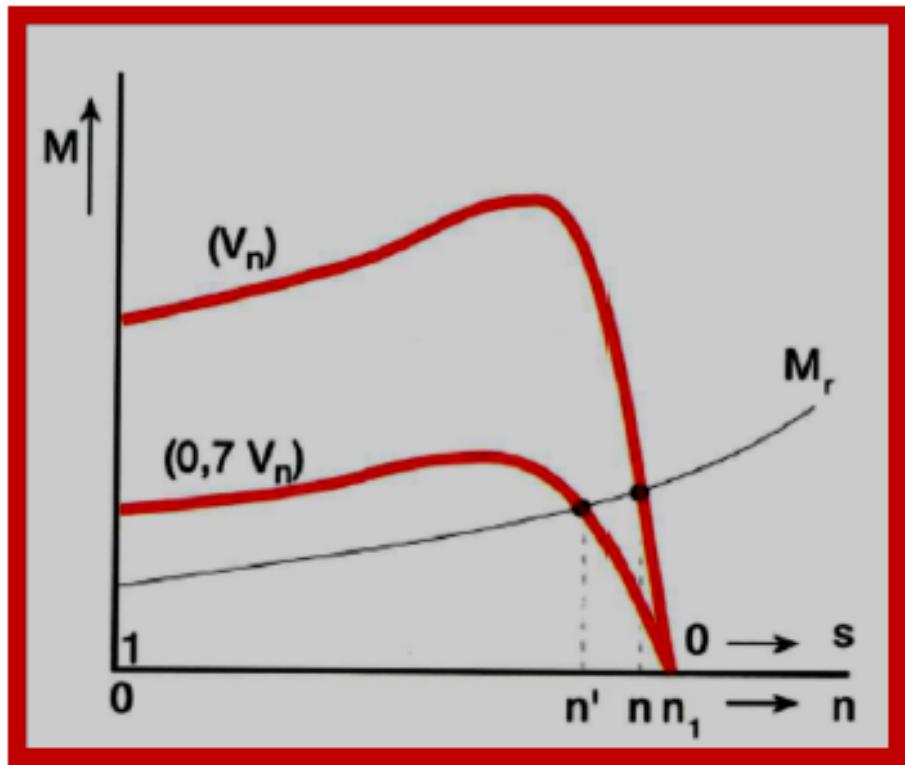




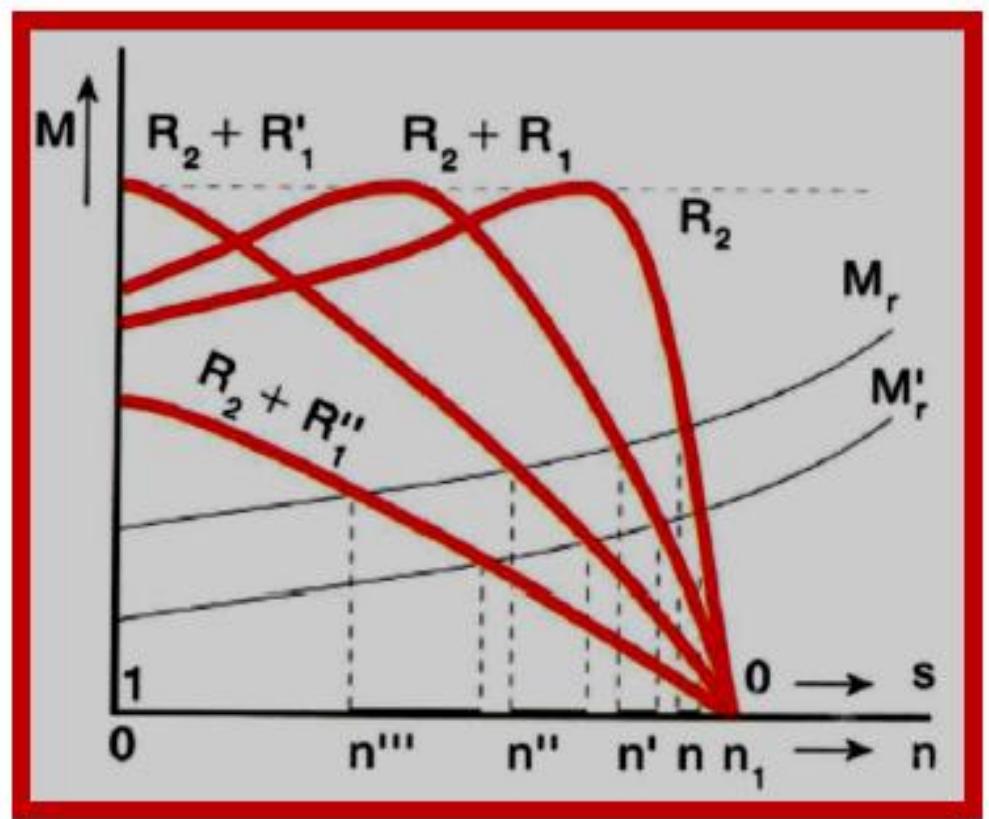
7.3. CONTROL DE VELOCIDAD POR MODIFICACIÓN DEL DESLIZAMIENTO

EL deslizamiento de un motor se puede variar modificando la tensión de alimentación. Si la tensión disminuye, la velocidad de giro del rotor disminuye, y por tanto aumenta el deslizamiento.

En la figura de la derecha, se puede apreciar la característica mecánica $M=f(n)$ de un motor asincrónico cuando se alimenta a tensión nominal V_n o al 70% de su valor $0,7V_n$, donde M_r representa el par resistente.



Como ya se comentó en apartados anteriores, es posible controlar en parte la velocidad ($\pm 25\%$) de un motor con rotor bobinado de anillos rozantes intercalando resistencias en el rotor. En la gráfica se puede apreciar como varia el par en función de la velocidad para este tipo de motores en función de la resistencia conectada.



8.BALANCE DE POTENCIAS EN UN MOTOR ASÍNCRONO

La potencia de una carga polifásica es la suma de las potencias de cada una de sus fases. En una red con tres fases (R,S,T) la potencia de una carga trifásica será

$$P_T = P_R + P_S + P_T$$

$$Q_T = Q_R + Q_S + Q_T$$

En una carga equilibrada, como es el caso de un motor trifásico, podemos poner:

$$P_T = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi$$

$$Q_T = \sqrt{3} * U * I * \sin \varphi$$

donde:

U = Tensión de línea en [V]

I= Intensidad de línea en [A]

φ = Angulo de desfase [$\varphi_u - \varphi_i$]

De la parte de la potencia activa absorbida por la red parte se pierde en la resistencia del bobinado estatórico, es lo que se conoce como pérdidas en el cobre en el estator:

$$P_{Cu1} = 3 R_f * I^2$$

Donde R_f es la parte de la resistencia de cada fase en ohmios, I es la corriente de fase en amperios y P_{Cu1} son las pérdidas totales en el cobre en el estator de un motor trifásico.

La diferencia entre la potencia absorbida por la red y las pérdidas en el cobre del estator, es la potencia que queda para crear el campo magnético:

$$P_C = P_T - P_{Cu1}$$

Como es sabido el rotor está constituido por un bobinado cerrado sobre si mismo que al cortar el flujo se induce una f.e.m. en él y por el que circula una corriente. Para el caso de un motor trifásico la pérdidas en el cobre del rotor vienen dadas por la expresión:

$$P_{Cu2} = 3 * I_2^2 * R_2$$

Donde I_2 representa la corriente que circula por cada una de las fases y R_2 la resistencia de cada una de las fases del bobinado rotórico

De este modo la potencia mecánica entregada al rotor es:

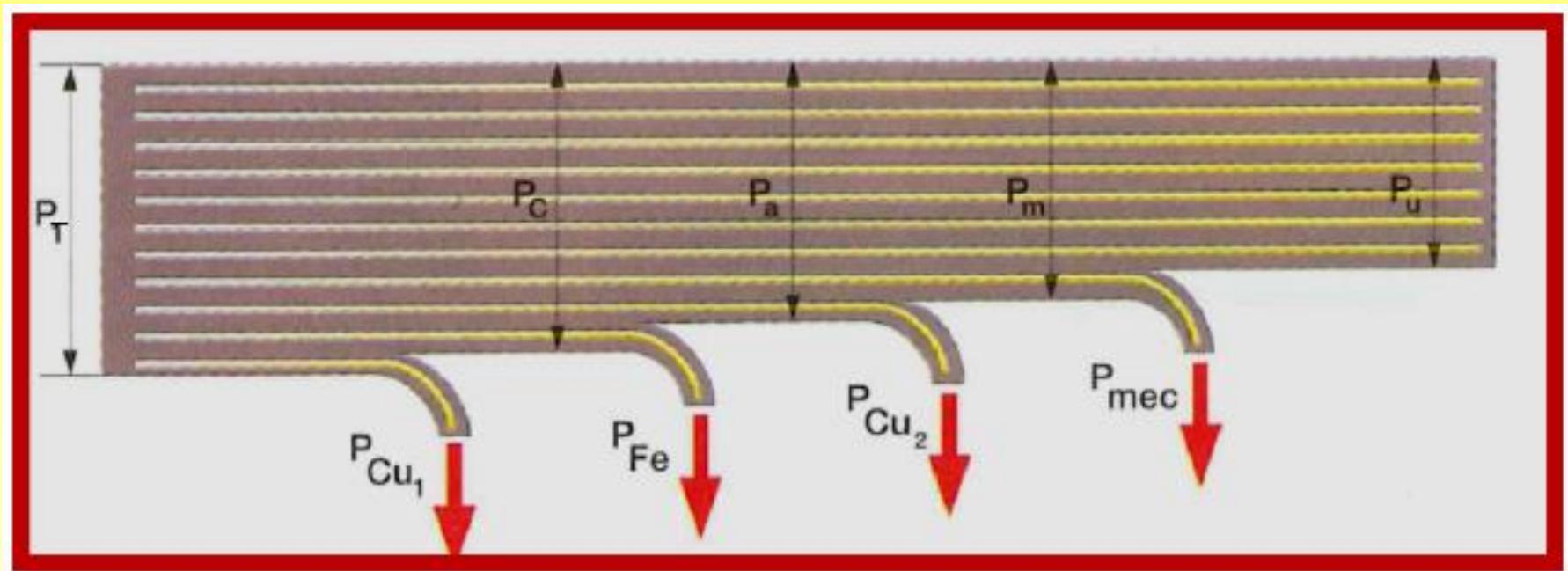
$$P_m = 3Pa - P_{Cu2}$$

Finalmente existirán una pérdidas mecánicas por rozamientos, de modo que la potencia realmente útil en el eje del rotor es:

$$Pu = Pm - Pmec$$

El rendimiento de un motor asincrono viene dado por la expresión ya conocida:

$$\eta = \frac{Pu}{P_T}$$

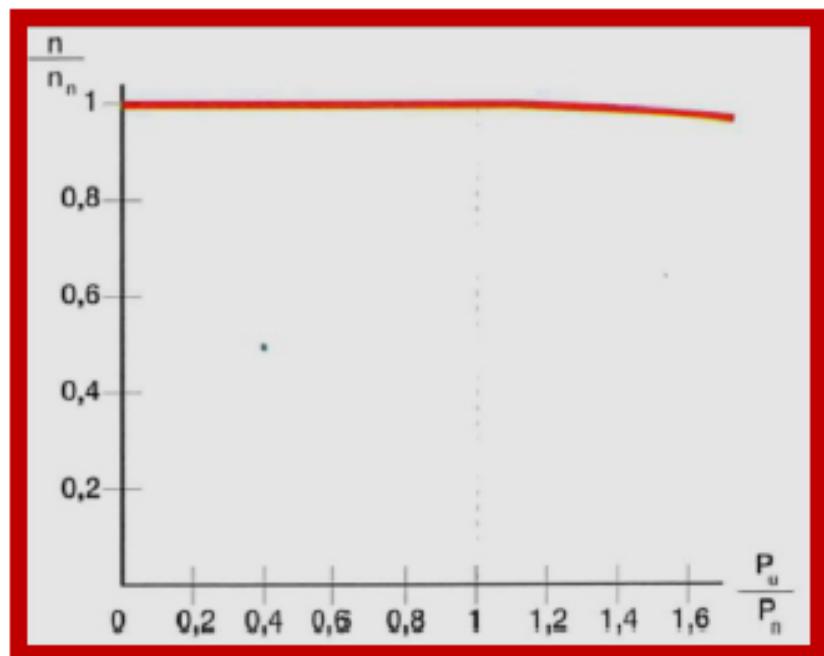


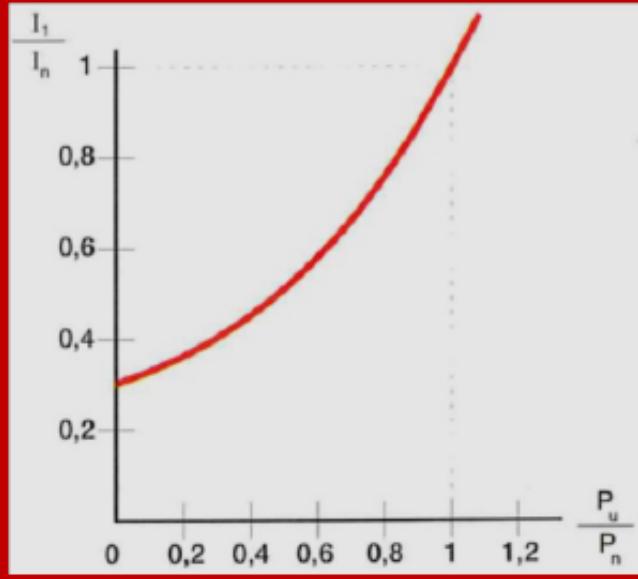
9. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR ASÍNCRONO.

Aunque ya se han visto a lo largo del tema varias de las curvas características que determinan el funcionamiento de un motor asíncrono, a continuación se relacionan las más comúnmente utilizadas:

Curva característica de velocidad [$n=f(P_u)$]

Indica como varia la velocidad en función de la potencia útil manteniendo constantes la tensión y la frecuencia.



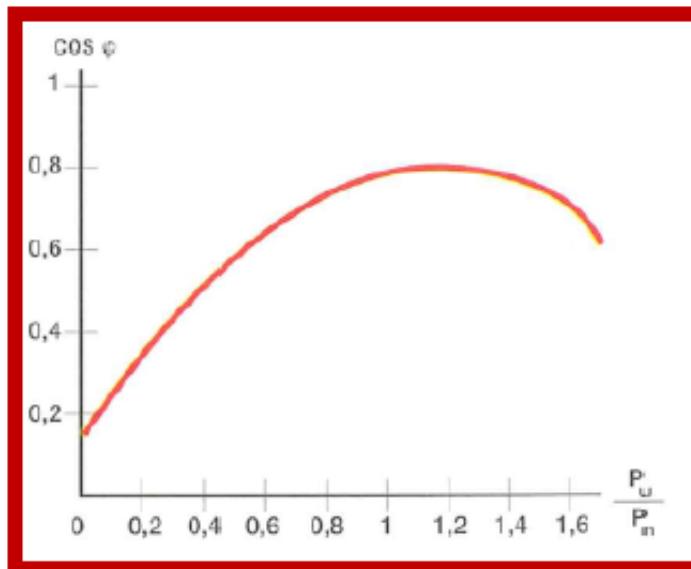


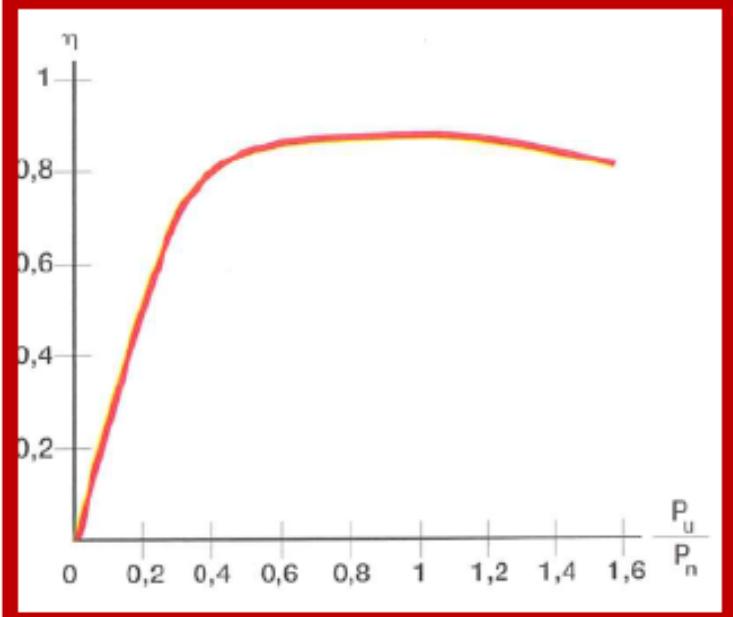
Curva característica de consumo.
[$I_1=f(P_u)$]

Con tensión y frecuencia constantes, relaciona la corriente absorbida en función de la potencia útil. Cuando el motor gira en vacío ($P_u=0$) la corriente suele estar comprendida entre 0,25 y 0,5 veces la corriente nominal de funcionamiento.

Curva característica de factor de potencia [$\cos \phi=f(P_u)$]

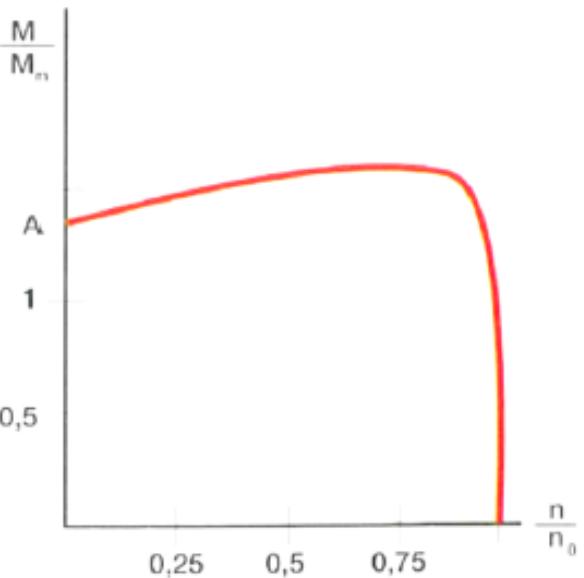
Con tensión y frecuencia constantes, relaciona el f.d.p. con la P_u . El f.d.p. de un motor es máximo cuando trabaja a régimen nominal.





Curva característica de rendimiento [$\eta=f(pu)$]

A tensión y frecuencia constantes relaciona el rendimiento con P_u



Curva característica mecánica [$M=f(n)$]

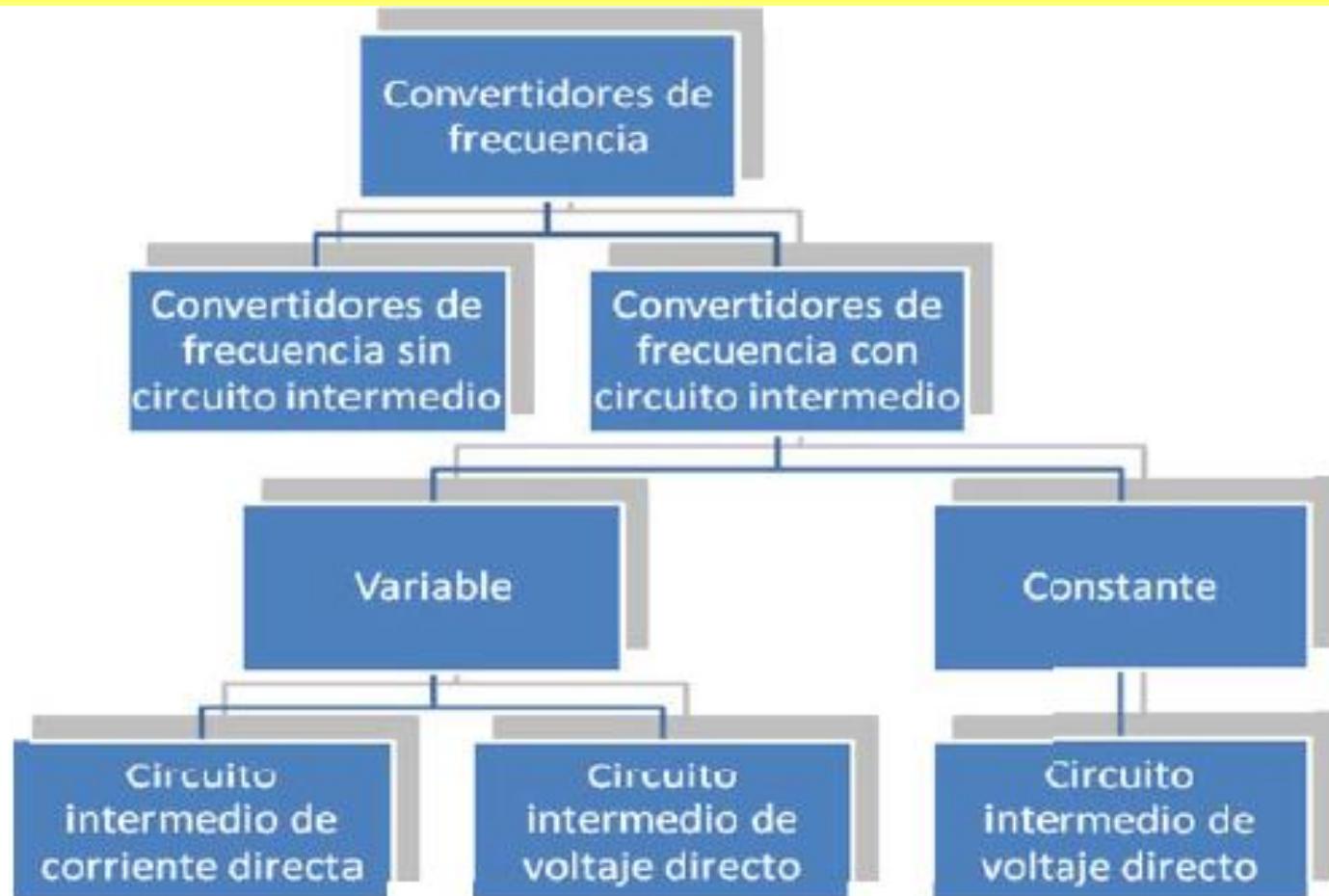
A tensión y frecuencia constantes relaciona el par motor con la velocidad de giro del motor. Es la curva más importante a efectos de elección de la máquina

2.3. ¿Qué es un variador de frecuencia?

Un variador de frecuencia (VFD, del inglés: Variable Frequency Drive, o bien AFD, Adjustable Frequency Drive, es una unidad que proporciona infinitamente el control variable de la velocidad de motores de corriente alterna de tres fases, convirtiendo el voltaje y la frecuencia fijos de la red eléctrica en cantidades variables. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de CA, microdrivers, convertidores o inversores.

La mayoría enorme de los convertidores de frecuencia estáticos usados por la industria hoy para controlar o regular la velocidad de motores de corriente alterna de tres fases es diseñada según dos principios diferentes (figura 2.4):

- convertidores de frecuencia sin un circuito intermedio (también conocido como convertidores directos), y
- convertidores de frecuencia con un circuito variable o constante intermedio.



Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know

Los convertidores de frecuencia con un circuito intermedio tienen circuito intermedio de corriente continua o una corriente de intermedio de voltaje directo y son llamados inversores alimentados por corriente o inversores alimentados por voltaje.

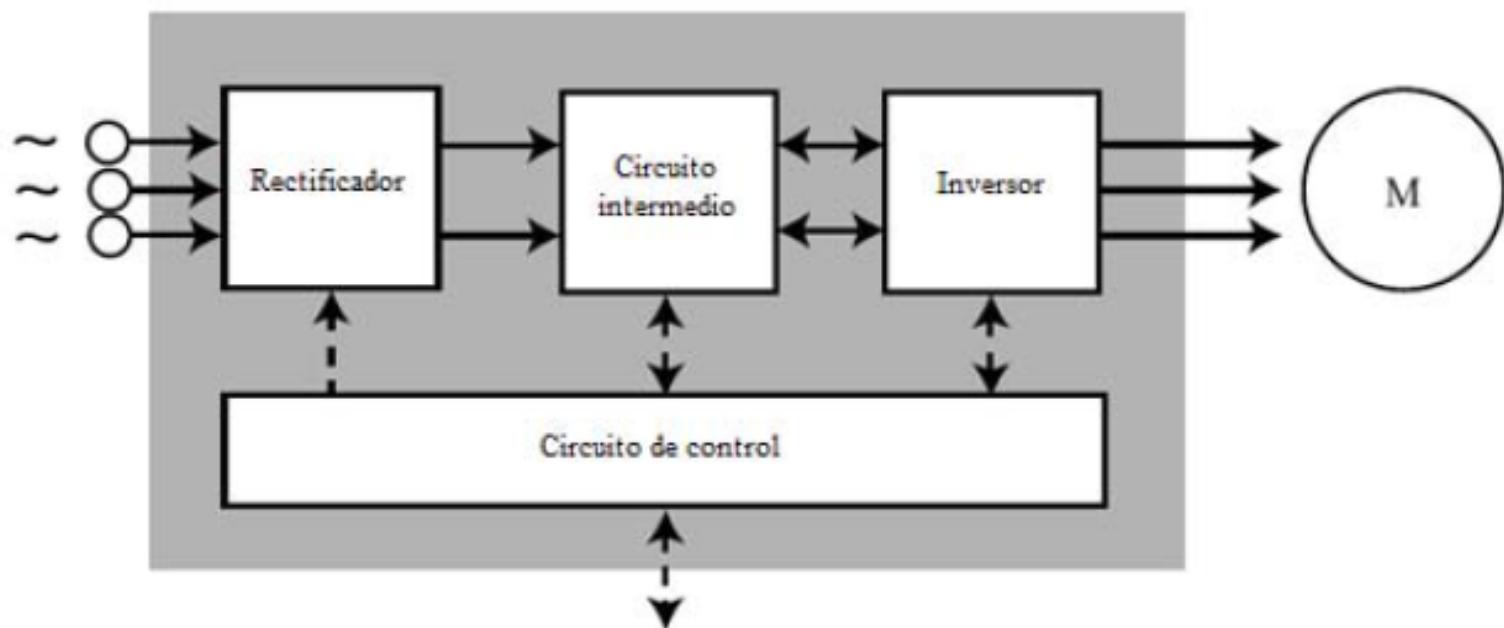
Inversores de circuito intermedios ofrecen un número de ventajas sobre el inversor directo, como:

- Mejor control sobre la corriente reactiva.
- Reducción de armónicas.
- No tiene limitaciones en lo que respecta a la frecuencia de salida, en comparación al rango aceptado por los motores convencionales.

Inversores directos tienden a ser ligeramente más baratos que inversores de circuito intermedios, aunque ellos típicamente sufren de la reducción más pobre de armonía.

En este trabajo nos enfocaremos a un tipo de variador en específico, en el que cuenta con circuito intermedio de voltaje de DC, ya que bajo este principio se encuentra diseñado el variador utilizado para el estudio del ahorro de energía.

Los convertidores de frecuencia se pueden dividir en cuatro componentes principalmente (figura 2.5):

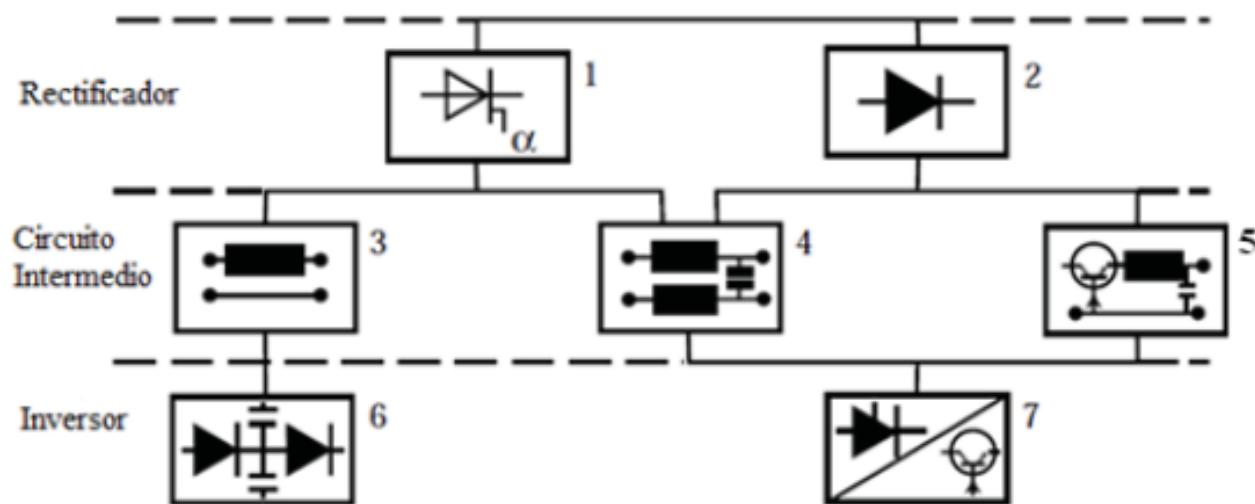


Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know

Figura 2.5 Componentes de un convertidor de frecuencia.

1. El rectificador, que es conectado a la red eléctrica de corriente alterna, suministra y genera un voltaje de corriente continua que pulsa. Hay dos tipos básicos de rectificadores - controlados y no controlados.
2. El circuito intermedio. Hay tres tipos:
 - a. Uno que convierte el voltaje rectificado en una corriente continua.
 - b. Otro que estabiliza o alisa el voltaje pulsante de DC y lo pone a disposición del inversor.
 - c. Tercero; que convierte el voltaje de DC constante del rectificador, a un voltaje de CA variable.
3. El inversor que genera la frecuencia del voltaje de motor. O bien, algunos inversores también pueden convertir el voltaje de corriente continua constante en un voltaje de corriente alterna variable.
4. La electrónica del circuito de control transmite y recibe señales del rectificador, el circuito intermedio y el inversor. Lo que todos los convertidores de frecuencia tienen en común es que el circuito de control manda las señales encender o apagar los semiconductores del inversor. Los convertidores de frecuencia son divididos según el modelo de conmutación que controla el voltaje de suministro al motor.

En la figura 2.6, se muestra los diferentes diseños/principios de control:



Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know

Figura 2.6 Diferentes diseños/principios de control.

Inversor de corriente fuente: CSI

(1 + 3 + 6)

Convertidor modulado por amplitud de pulso: PAM

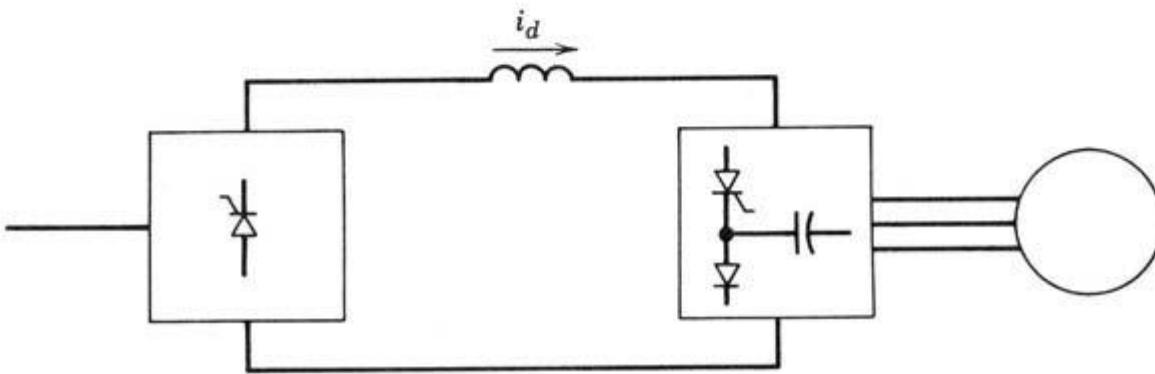
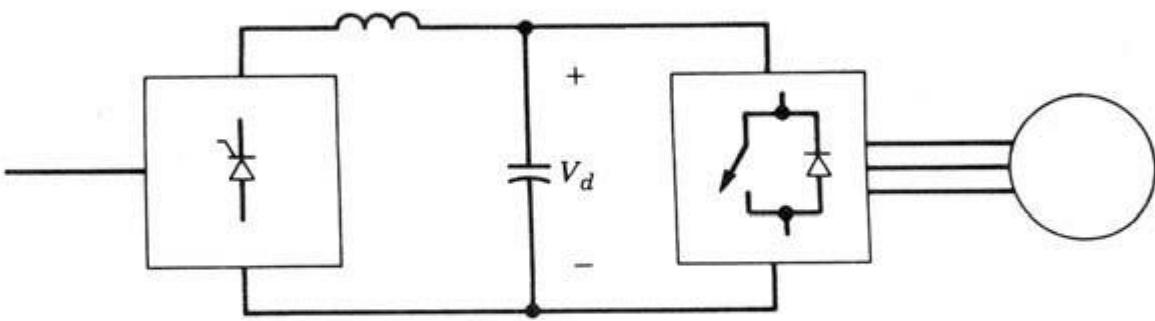
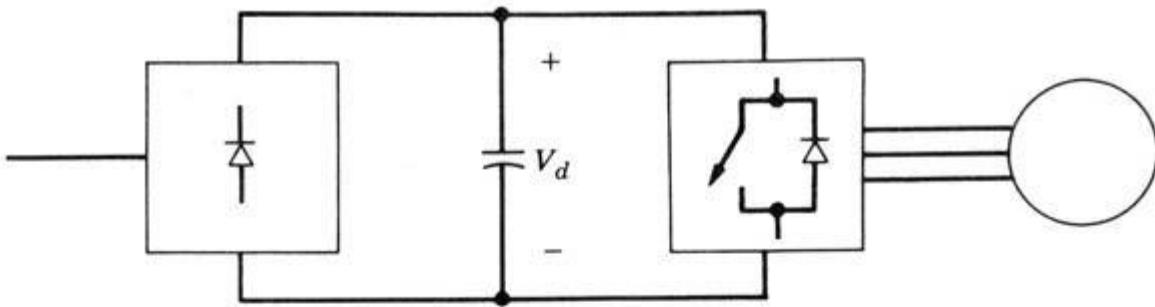
(1 + 4 + 7) (2 + 5 + 7)

Convertidor modulado por ancho de pulso: PWM

(2 + 4 + 7)

El funcionamiento del variador de frecuencia con circuito intermedio es el siguiente:

1. Rectificador. Este convierte la alimentación de alterna en directa, puede estar compuesto por diodos, tiristores o ambos. Un rectificador que consiste en diodos no está controlado, el que consiste en tiristores es controlado. Si ambos se utilizan (diodos y tiristores), el rectificador está semi-controlado.
2. Circuito intermedio. El circuito intermedio puede verse como una instalación de almacenamiento de la cual el motor es capaz de extraer su energía a través del inversor. Puede ser construido de acuerdo a tres principios diferentes en función del rectificador y el inversor.
3. Inversor. El inversor es el último eslabón en el convertidor de frecuencia antes del motor y el punto donde la adaptación final de la salida de tensión se produce. El convertidor de frecuencia garantiza unas buenas condiciones de funcionamiento en todo el rango de control mediante la adaptación de la tensión de salida a las condiciones de carga. Así, es posible mantener la magnetización del motor en el valor óptimo



Clasificación de convertidores de frecuencia variable: a) PWM-VSI con un rectificador de diodos; b) VSI de ondas cuadradas con un rectificador controlado; c) CSI con un rectificador controlado.

COMPARACIÓN DE ACCIONAMIENTOS DE FRECUENCIA VARIABLE

Es posible usar los tres tipos de accionamientos (PWM-VSI, VSI de ondas cuadradas y CSI) con motores de inducción multiusos. Los tres proporcionan una capacidad de par de torsión constante, desde la velocidad especificada hasta alguna velocidad muy baja donde el enfriamiento reducido en el motor dicte que se disminuya la capacidad del par de torsión. La desproporción del motor como porcentaje del índice de caballos de potencia indicado en la placa del motor es en esencia independiente del tipo de accionamiento.

A pesar de la naturaleza un tanto similar de estos tres tipos de accionamiento, existen ciertas diferencias básicas que se comparan en la tabla 14-2, donde “+” es un atributo positivo y “-” es uno negativo. Se debe tener en cuenta que esta comparación aborda la capacidad inherente de cada accionamiento. Por medio de circuitos adicionales se supera la mayoría de las limitaciones.

Vale la pena formular algunos comentarios generales acerca de la tendencia para la aplicación de estos accionamientos. Para aplicaciones de reequipamiento se prefieren los PWM-VSI ante los CSI, que requieren una mejor combinación entre el inversor y el motor. Para tamaños inferiores a unos cuantos cientos de caballos de potencia cada vez se tiende más a usar PWM-VSI.

Para mejorar la confiabilidad de estos controladores de estado sólido se incorpora una infinidad de otras características de protección, como el disparo instantáneo de sobrecorriente, disyuntores de circuitos de entrada, fusibles de limitación de corriente, reactores de línea o transformadores de aislamiento en la entrada, interruptor de desconexión de salida entre el VSI y el motor, protección térmica del motor incorporada en el controlador, disparos, desconexiones en caso de sobretensión, falta de tensión, pérdida de fase, etcétera.

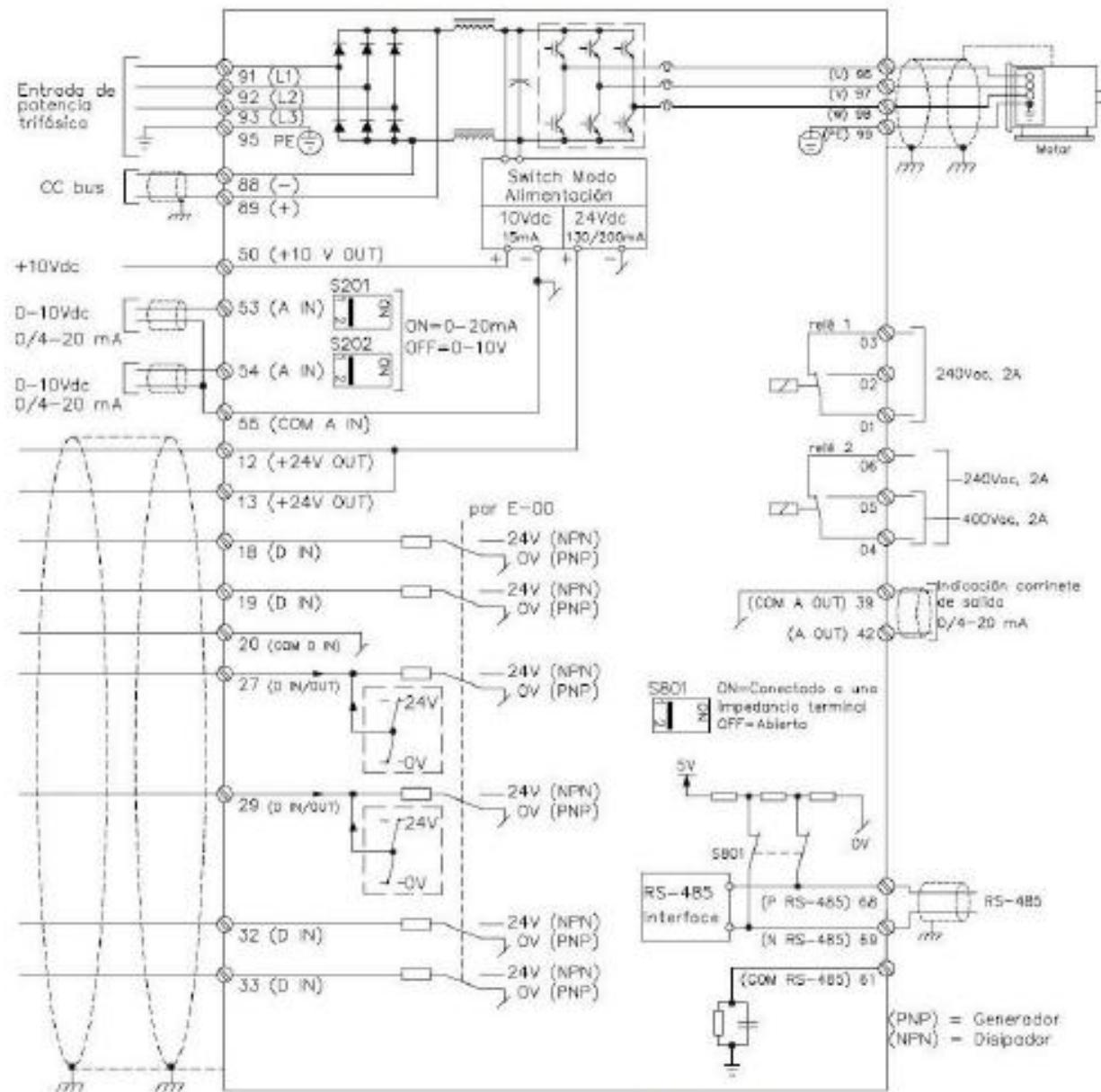
Comparación de accionamientos de frecuencia ajustable

<i>Parámetro</i>	<i>PWM</i>	<i>Ondas cuadradas</i>	<i>CSI</i>
Factor de potencia de entrada	+	-	--
Pulsaciones del par de torsión	++	-	-
Capacidad multimotor	+	+	-
Regeneración	-	-	++
Protección contra cortocircuitos	-	-	++
Protección contra circuitos abiertos	+	+	-
Capacidad para manejar motores demasiado pequeños	+	+	-
Capacidad para manejar motores demasiado grandes	-	-	-
Eficiencia con velocidades bajas	-	+	+
Tamaño y peso	+	+	--
Capacidad de trayectoria directa	+	-	-

En el mercado actual podemos encontrar diferentes marcas comercializadoras de convertidores de frecuencia, por ejemplo, ABB, LG, Yaskawa, Siemens, Telemecanique, Mitsubishi, Danfoss, etc., véase la figura 2.7.



Figura 2.7 Diferentes marcas de variadores de frecuencia.



Fuente: Danfoss®, "Guía de diseño VLT® HVAC".

Figura 2.8 Diagrama del VLT® Danfoss®.

CONTROLADORES DE FRECUENCIA VARIABLE

2.1. Velocidad base

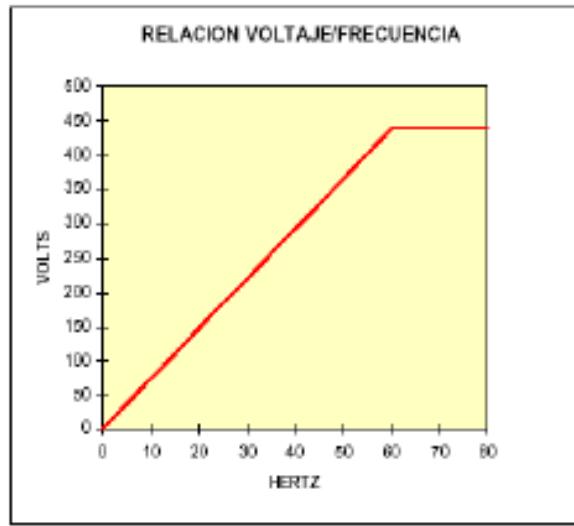
La velocidad de la flecha del motor a voltaje, frecuencia y carga nominal se conoce como velocidad base, cuando se varía la frecuencia de alimentación al motor por encima o por debajo de 60 Hz, el motor opera por encima o por debajo de la velocidad base.

2.2. Volts / Hz

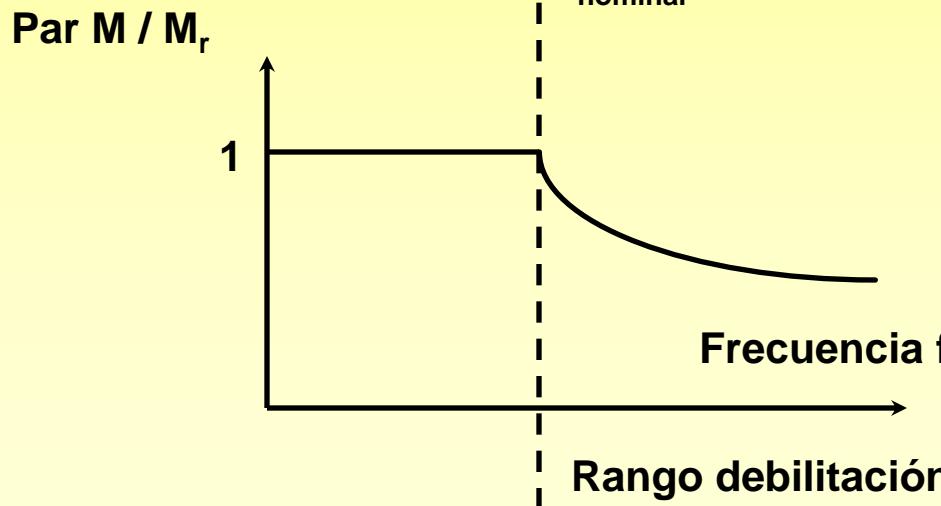
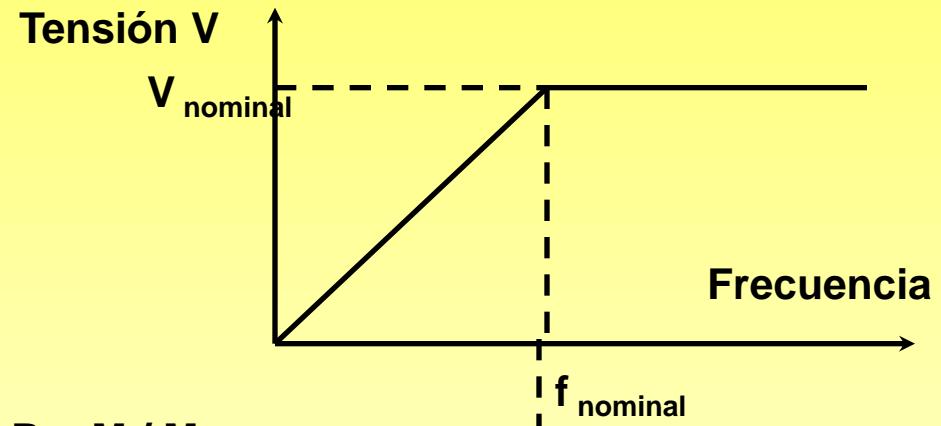
Los motores de inducción producen el torque debido al flujo en su campo rotatorio. Cuando se opera por debajo de su velocidad base el torque se lleva a cabo manteniendo constante la relación voltaje / frecuencia que se aplica al motor.

La relación para motores de 460V y 230V es:

Voltaje	Frecuencia	Volts / Hz
460	60	7.6
230	60	3.8



Características de par con característica V/f



**El par es constante hasta
La velocidad nominal.**

Si la relación Volts/Hz se incrementa al bajar la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente se incrementará llegando a ser excesiva. Si por el contrario la relación Volts/Hz se reduce al subir la frecuencia para elevar la velocidad del motor, la capacidad de torque se verá reducida.

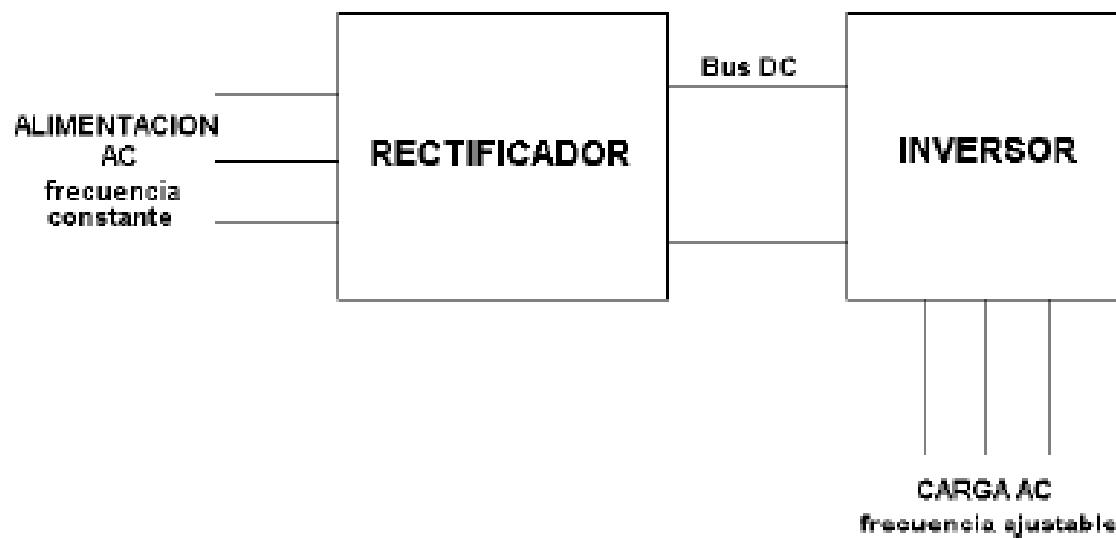
Cuando se opera por arriba de la velocidad base, la relación Volts/Hz se reduce ya que se aplica un voltaje constante al motor, que generalmente es el voltaje nominal, por lo que las capacidades de torque se reducen.

A frecuencias de alimentación del motor de 30 Hz y menores, la relación Volts/Hz no siempre se mantiene constante, ya que dependiendo del tipo de carga, el voltaje puede incrementarse para elevar la relación Volts/Hz para que el motor produzca un torque mayor, especialmente a velocidad cero. Este ajuste es llamado elevación de voltaje (Voltage Boost).

Cuando el motor opera con cargas ligeras se puede reducir la relación Volts/Hz para minimizar la corriente del motor, y debido a que se aplica un voltaje menor, se consigue reducir la corriente de magnetización y consecuentemente producir un torque menor que aún sea tolerable.

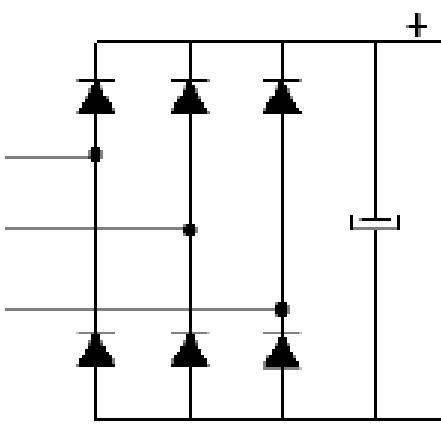
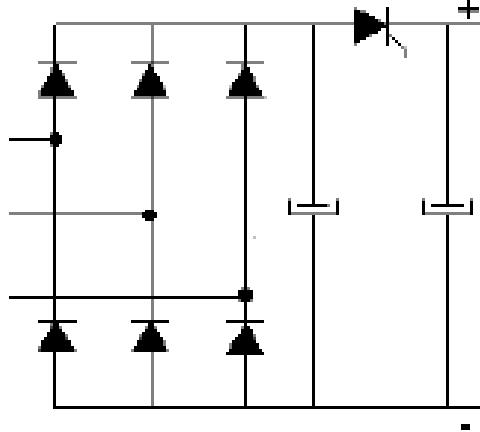
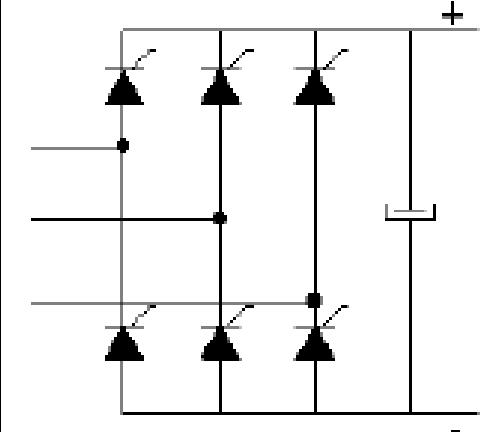
2.3. VDF

Los controladores de frecuencia variable de estado sólido constan de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor.



2.3.1 Rectificador

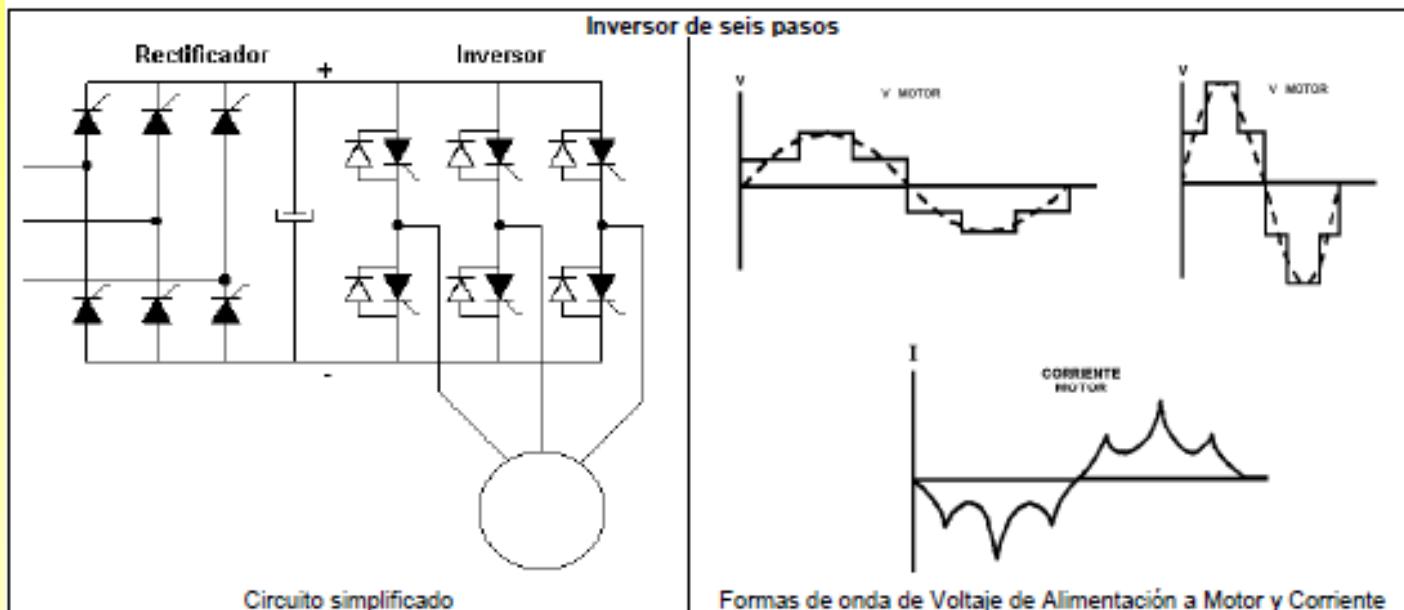
La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, siendo los siguientes métodos básicos los mas usados:

Diodos	DC Chopper	Tiristores
		
Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Si

2.3.2 Inversor

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para comutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

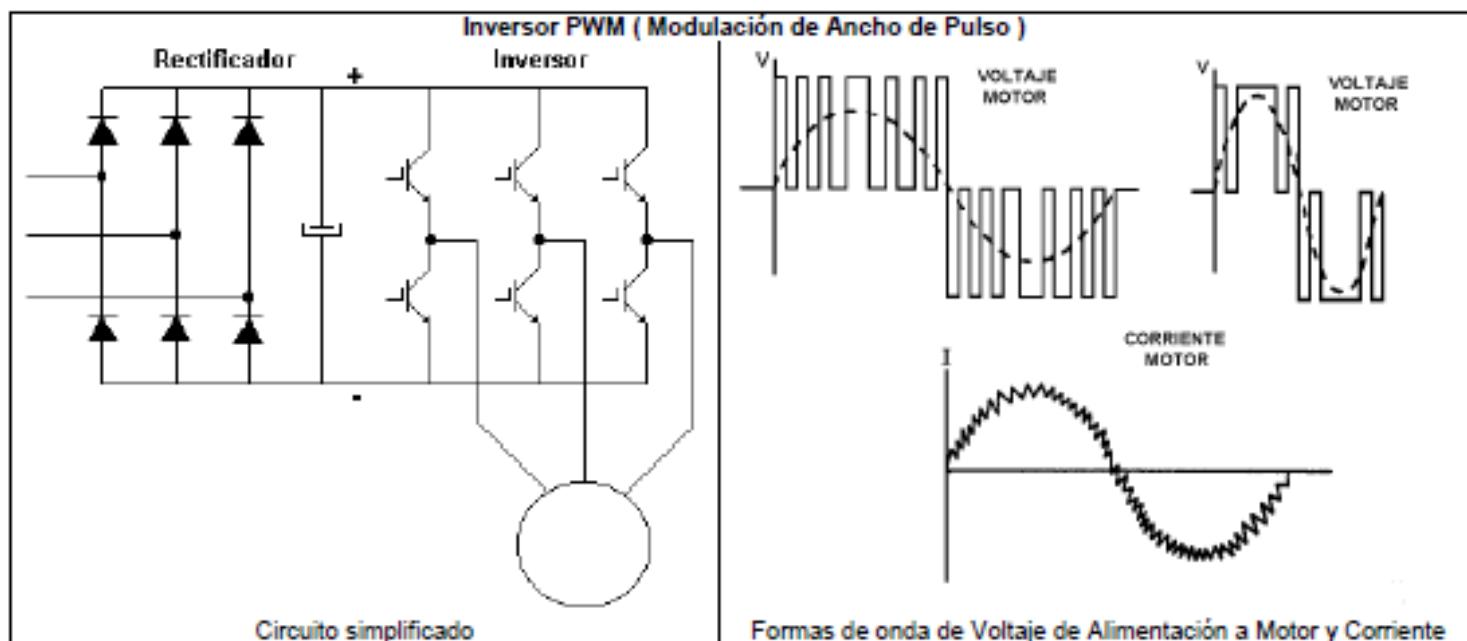
2.3.2.1 Inversor de seis pasos



Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pasos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación Volts-Hz constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

2.3.2.2 Inversor PWM



El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor. Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación.

3.0 Tipos de Cargas

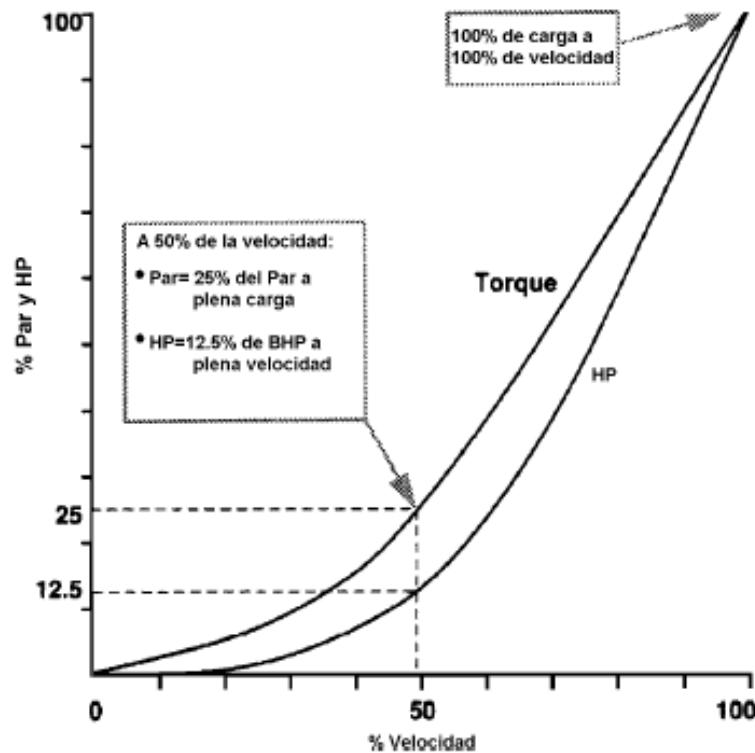
La primera consideración que se debe de hacer al aplicar un VFD es determinar el tipo de carga y sus características, debiendo de conocer los requerimientos de Par y Velocidad.

Las cargas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Cargas de Par Variable
- Cargas de Par Constante
- Cargas de Potencia Constante
- Cargas de Impacto

3.1 Cargas de Par Variable

Las cargas en las que el Par se reduce cuando operan por debajo de la velocidad base y se incrementa al operar por encima de dicha velocidad base se clasifican como Cargas de Par Variable. En muchas de estas cargas el par se reduce con el cuadrado de la velocidad, siendo las bombas centrífugas y cierto tipo de ventiladores y sopladores las cargas más representativas.



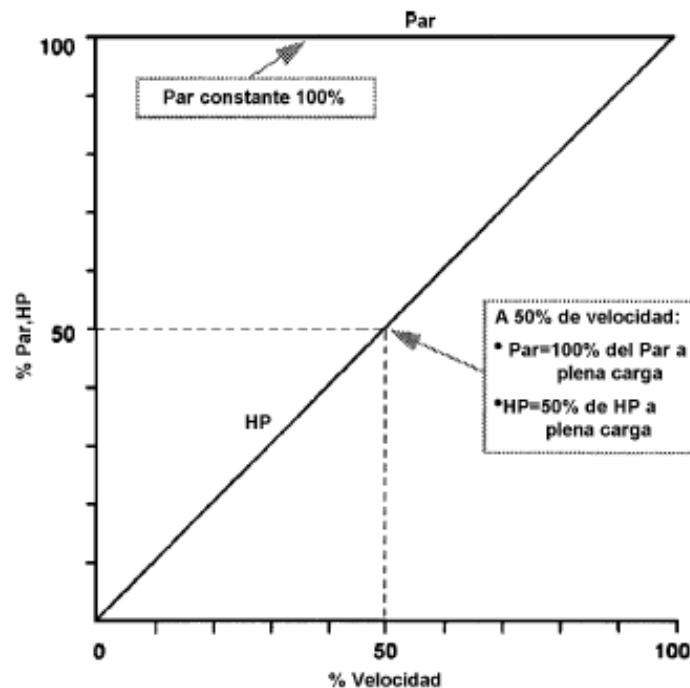
Comportamiento de Cargas de Par Variable

3.2 Cargas de Par Constante

Son cargas en las que el Par no es función de la velocidad sino que permanece constante, mientras que la potencia varía linealmente con la velocidad.

Las aplicaciones típicas son:

- Accionamientos de tracción
- Bandas transportadoras
- Bombas de desplazamiento positivo
- Grúas y malacates

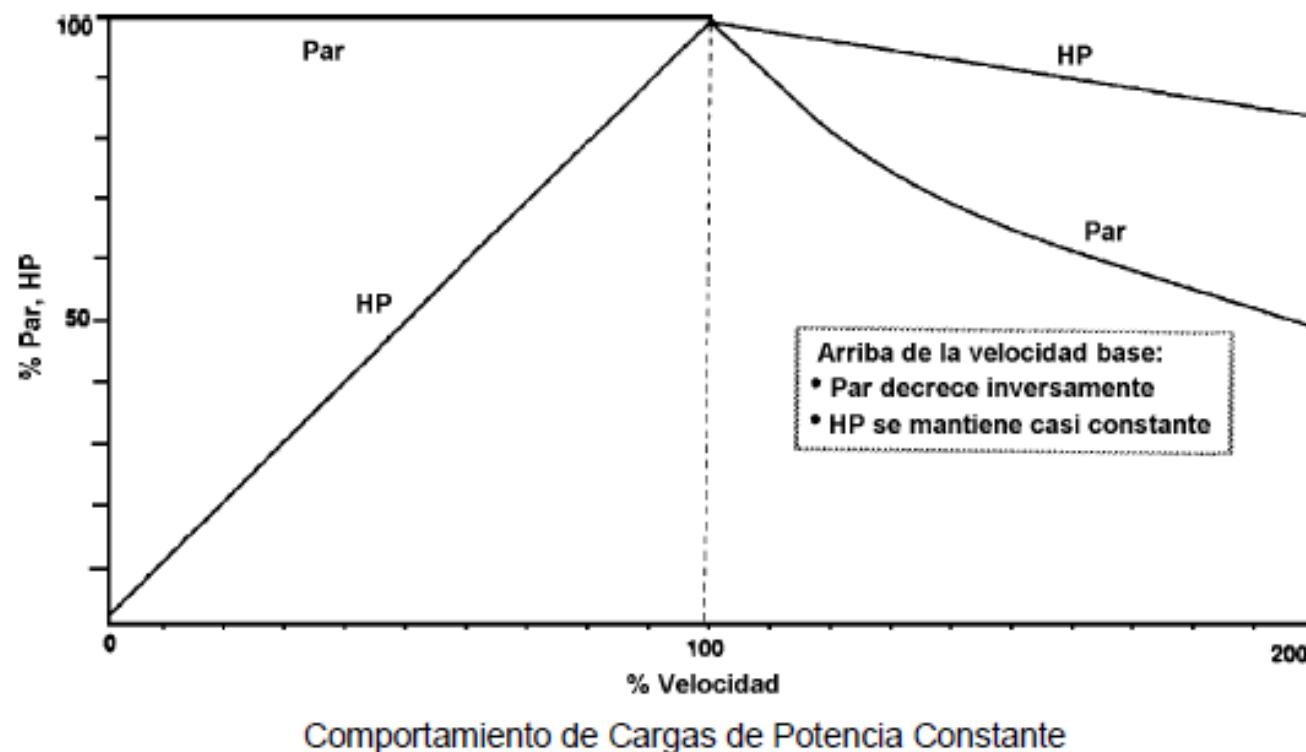


Comportamiento de Cargas de Par Constante

3.3 Cargas de Potencia Constante

En las cargas de potencia constante, cuando se opera por encima de la velocidad base, el Par requerido decrece, mientras que la potencia se mantiene casi constante. Las aplicaciones típicas son:

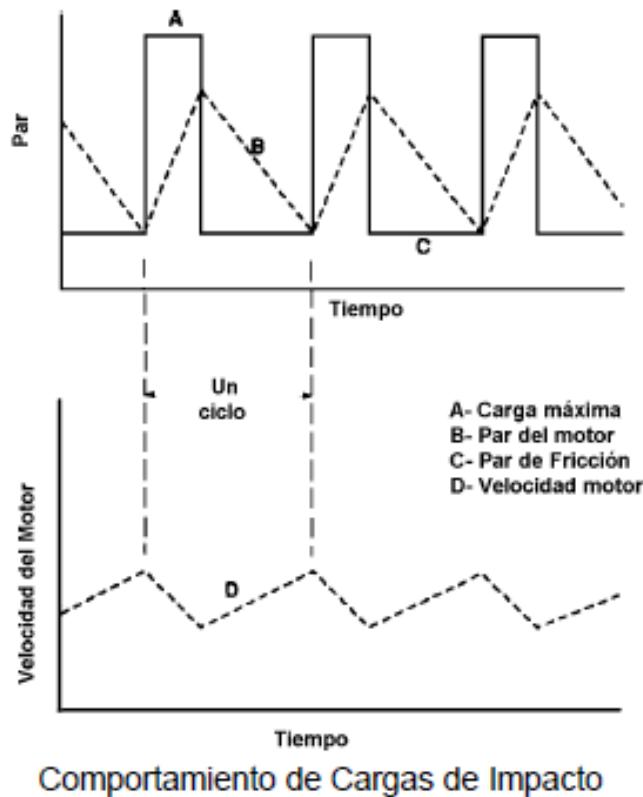
- Molinos
- Embobinadoras



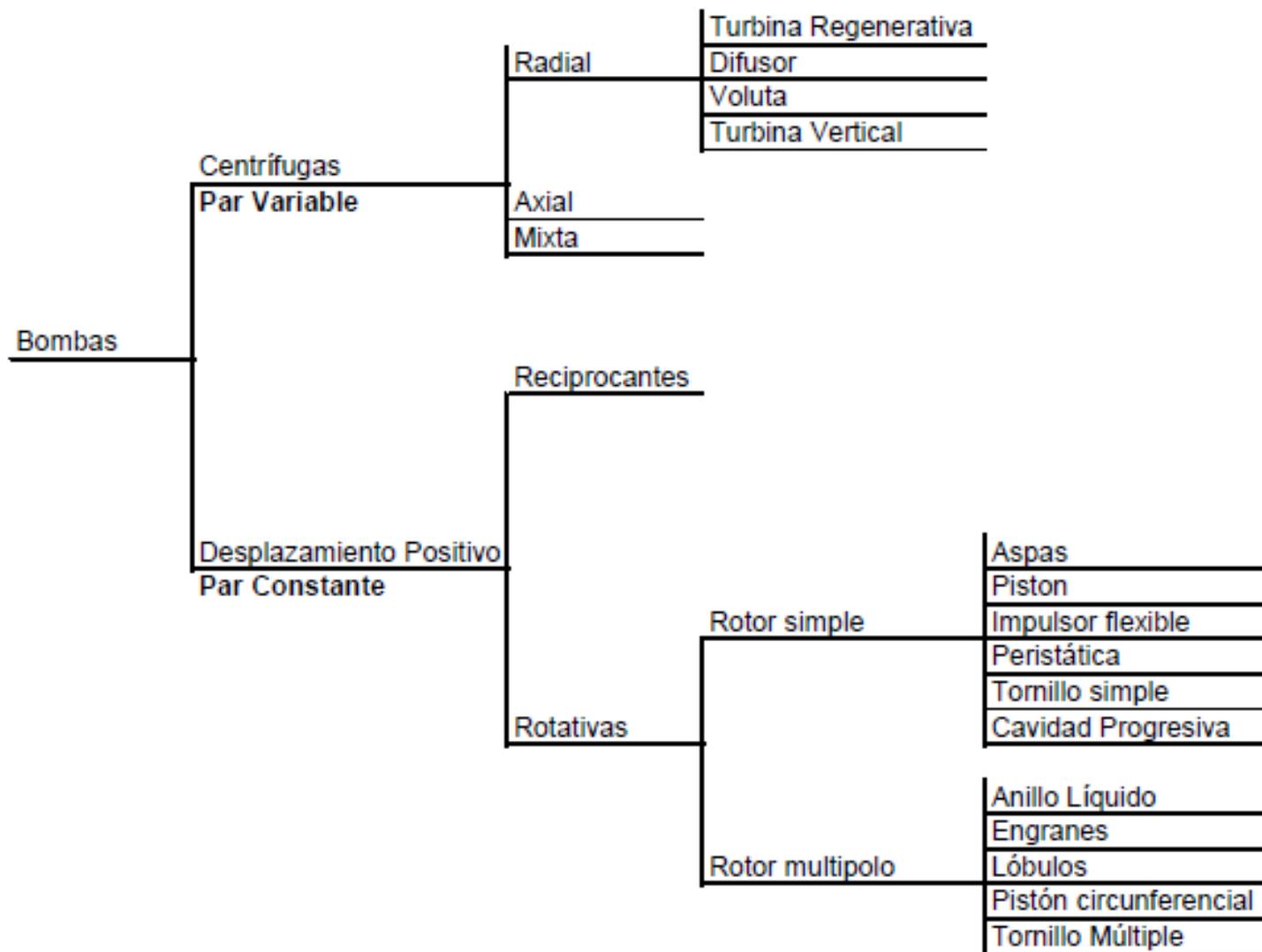
3.4 Cargas de Impacto

En las cargas de impacto tales las máquinas que cuentan con embragues de operación cíclica o las prensas de estampado de lámina, el Par es intermitente y no es función de la velocidad.

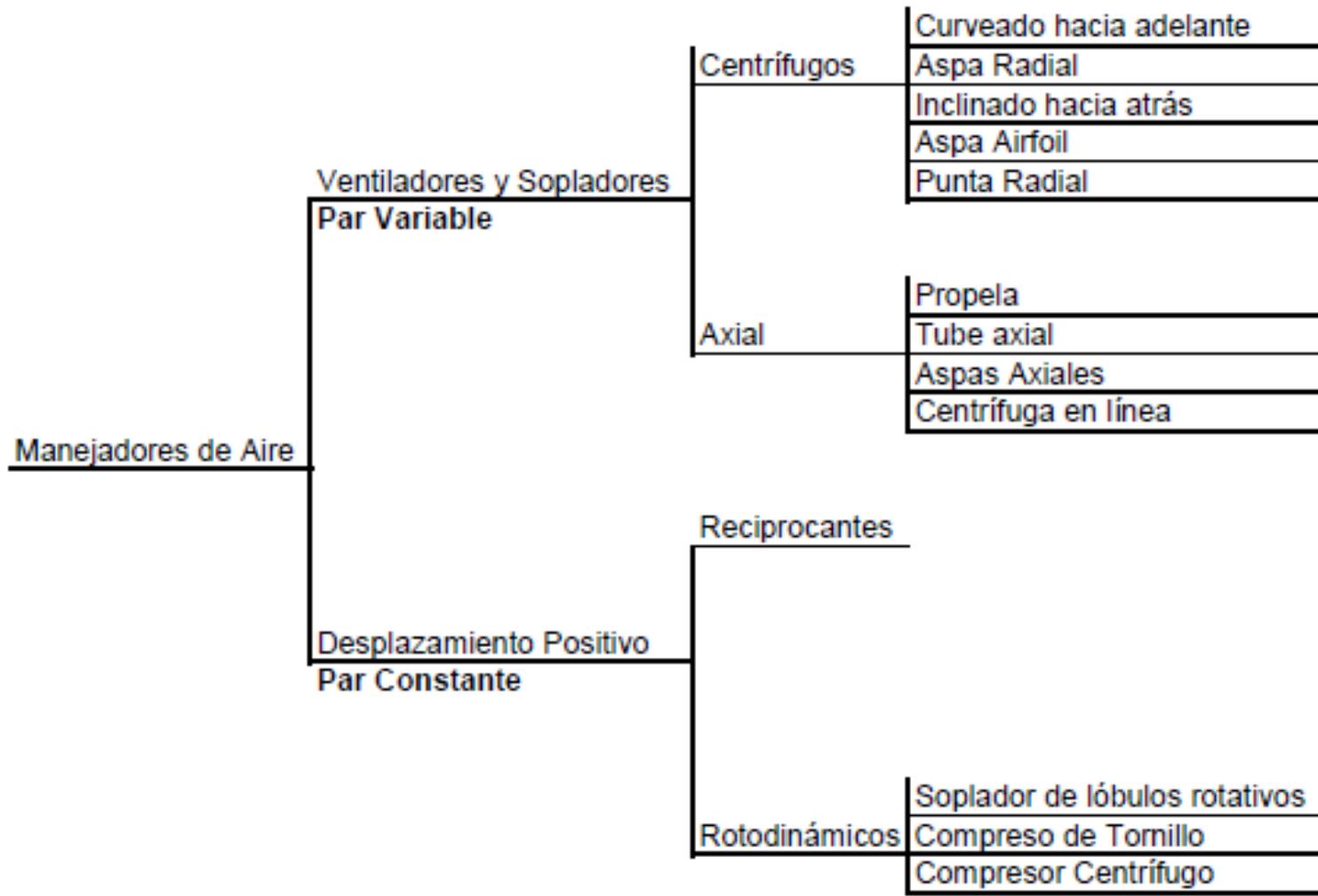
En el caso de las prensas se requiere que la combinación del motor y el VFD produzcan un par suficiente de aceleración para regresar el volante de inercia a la velocidad requerida antes de que inicie el siguiente ciclo.



Clasificación de Bombas



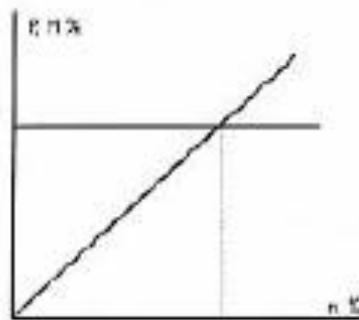
Clasificación de Manejadores de Aire



PROCESOS INDUSTRIALES Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Para estimar el ahorro es necesario conocer el proceso industrial en que se pretende instalar el regulador de velocidad. No todos los procesos ahorran energía, incluso hay procesos en que la energía no aumenta con la velocidad. Con el fin de identificar puntos de ahorro en la industria, vamos a ver a continuación las cargas típicas que nos podemos encontrar. En la mayoría de los procesos, se tendrán combinaciones de varios de estos tipos.

PAR CONSTANTE



EN LA INDUSTRIA LA MAYOR PARTE DE LAS MÁQUINAS
EMPLEADAS FUNCIONAN A PAR CTE.

EL PAR ES INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD

EN EL ARRANQUE EXISTE FRECUENTEMENTE UN SOBREPAR
INICIAL MÁS ELEVADO QUE EL PAR NOMINAL



Elevación



Grúas



Alimentadores



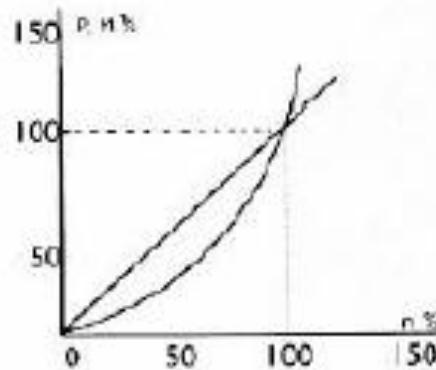
Transportadores

PAR CRECIENTE LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARÍA LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

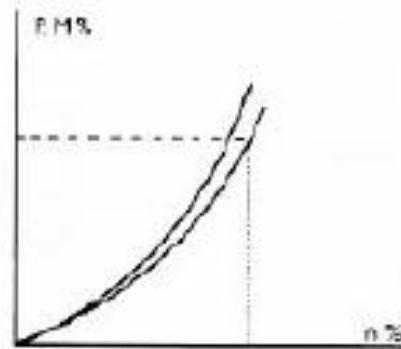
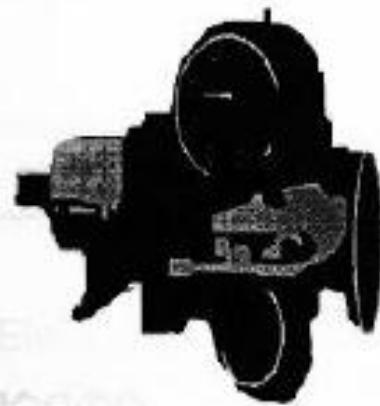
LA POTENCIA VARÍA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

EJEMPLOS: BOMBAS VOLUMÉTRICAS DE TORNILLO DE ARQUIMEDES Y MEZCLADORAS

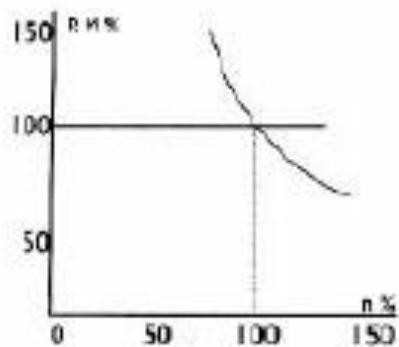


PAR CRECIENTE CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

- EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARIA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD
- LA POTENCIA LO HACE CON EL CUBO DE LA VELOCIDAD
- ES EL CASO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y LOS VENTILADORES



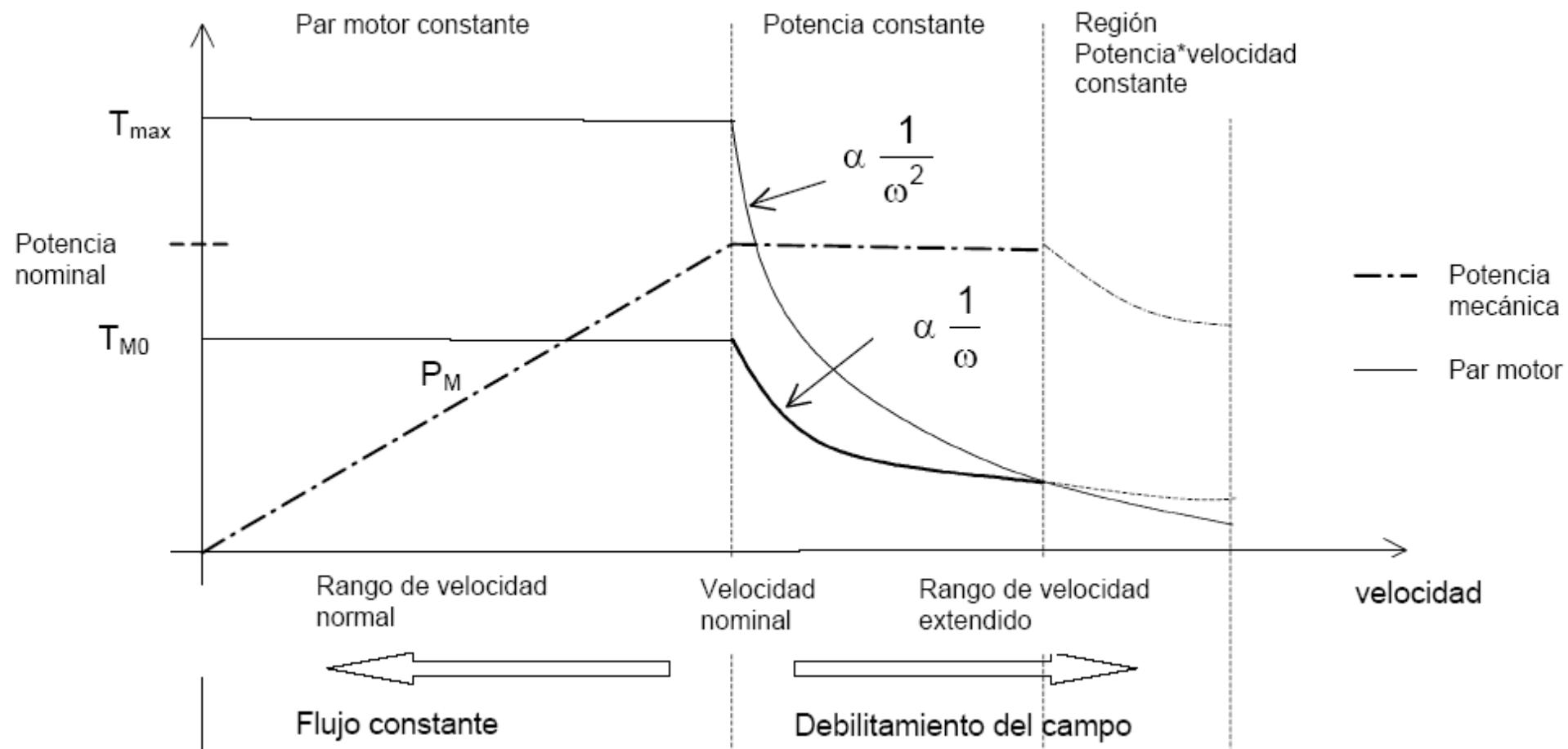
POTENCIA CONSTANTE

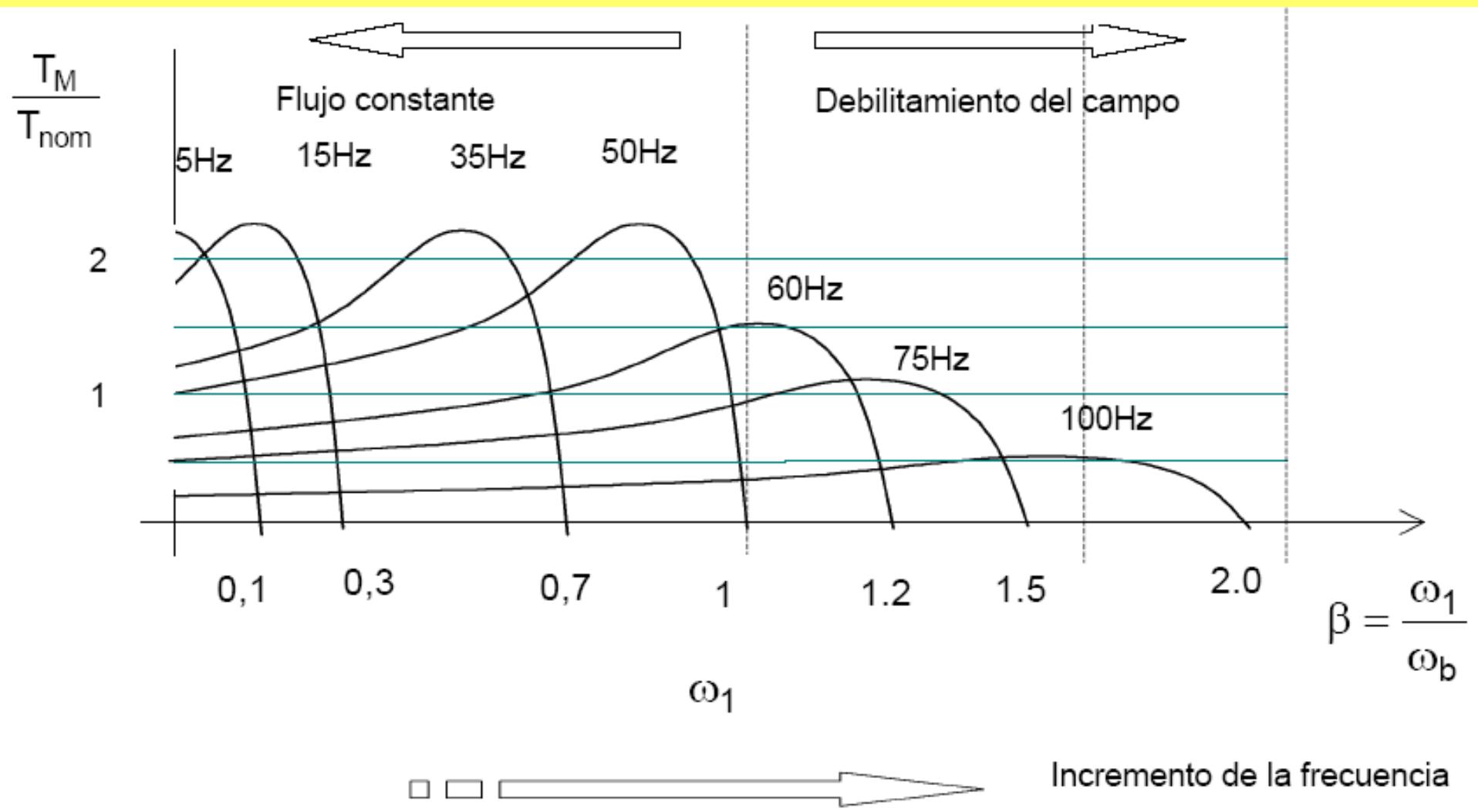


- LA POTENCIA REQUERIDA ES INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD
- FUNCIONAMIENTO PROPIO DE MÁQUINAS HERRAMIENTAS Y SISTEMAS DE ARROLLAMIENTO
- SE REQUIERE MENOR PAR, Y POR TANTO SE PUEDE UTILIZAR UN ACCIONAMIENTO MENOR.



Variación por método tensión-frecuencia extendido



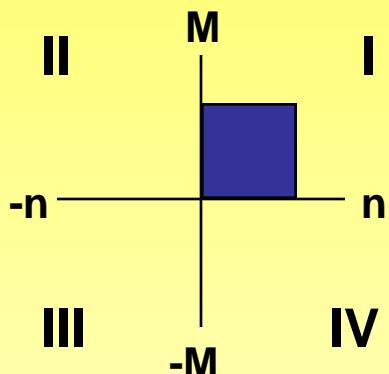
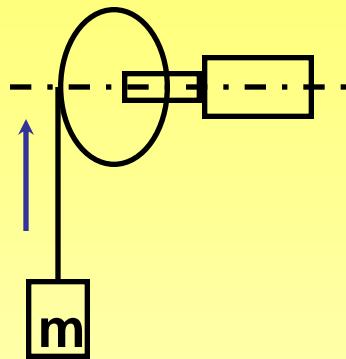


Aplicación de los variadores para motores de corriente alterna

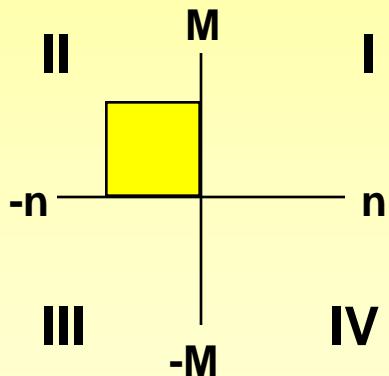
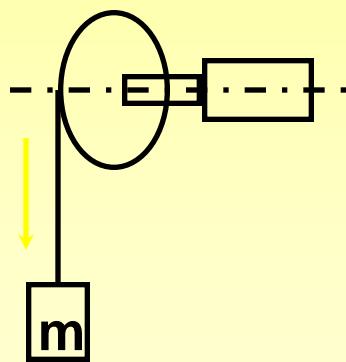
motor	cargas	variación de velocidad	potencia	rendimiento global	tipo de variación
asíncrono o síncrono	bombas, ventiladores, compresores, extrusores	0% a más de 100%	desde 10 kW a cientos de kW	0,85 a 0,90	rectificador/ondulador autónomo
asíncronos de anillos	ídem	60% a 100% *	algunos 100 kW a algunos MW	0,90 a 0,95	cascada hiposíncrona
síncrono	ídem centrifugadoras bogies TGV-A (gran velocidad)	0% a varias veces 100%	100 kW a algunos 10 MW	0,90 a 0,95	rectificador/ondulador autopilotado
asíncronos o síncronos	machacadoras, laminadores, hornos de cemento (pequeña velocidad)	0% a \pm 33%	100 kW a algunos 10 MW	0,85 a 0,90	ciclo convertidor

* : 100% corresponde a la velocidad relativa a 50 Hz.

OPERACIÓN DEL MOTOR



Modo motor

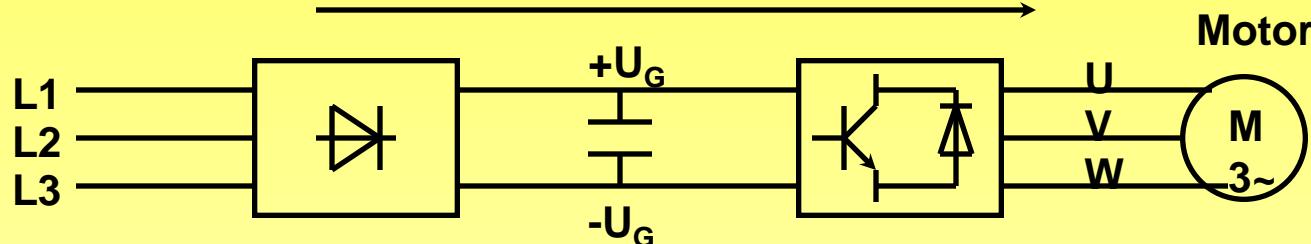


Modo generador

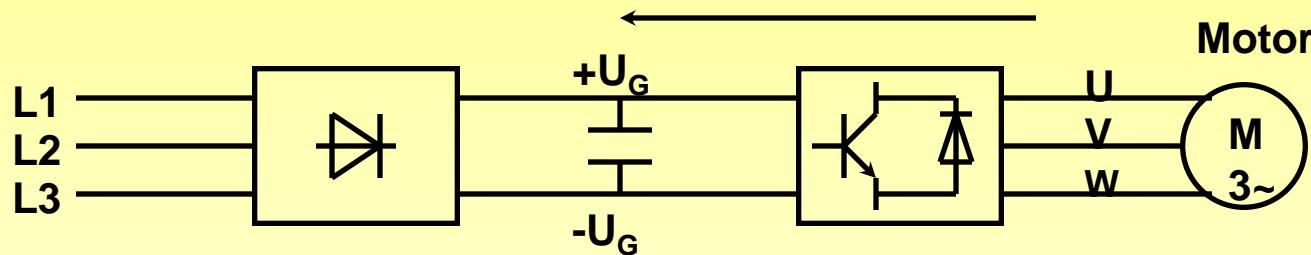
En modo generador la energía se envía al variador.

Dirección de la energía

Modo motor

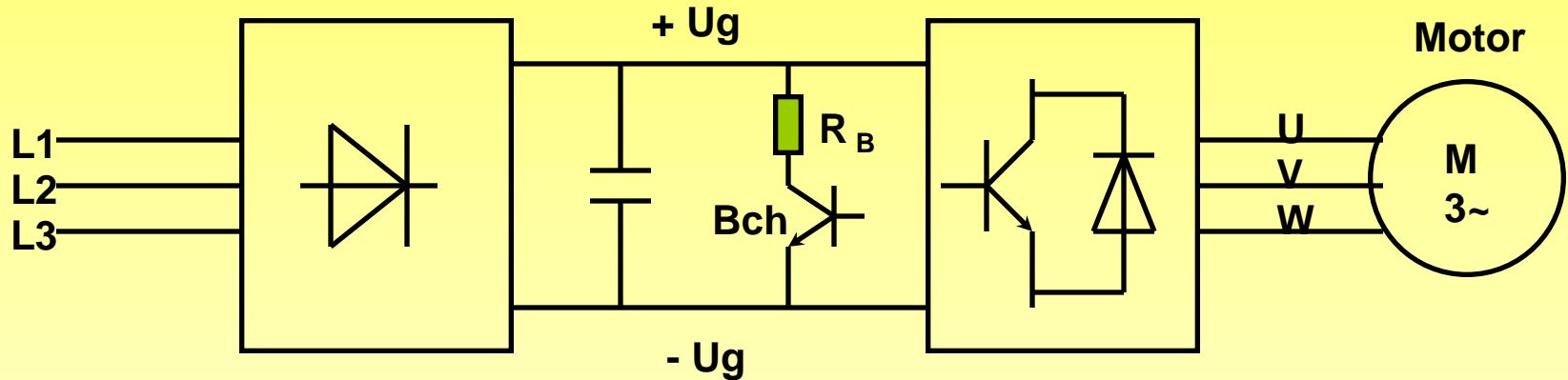


Modo generador



En modo generador, se produce un incremento en la tensión del bus de CC, debido a que el rectificador es incontrolado. Para evitar daños Al variador debido a tensiones muy altas, se puede instalar un choper de frenado.

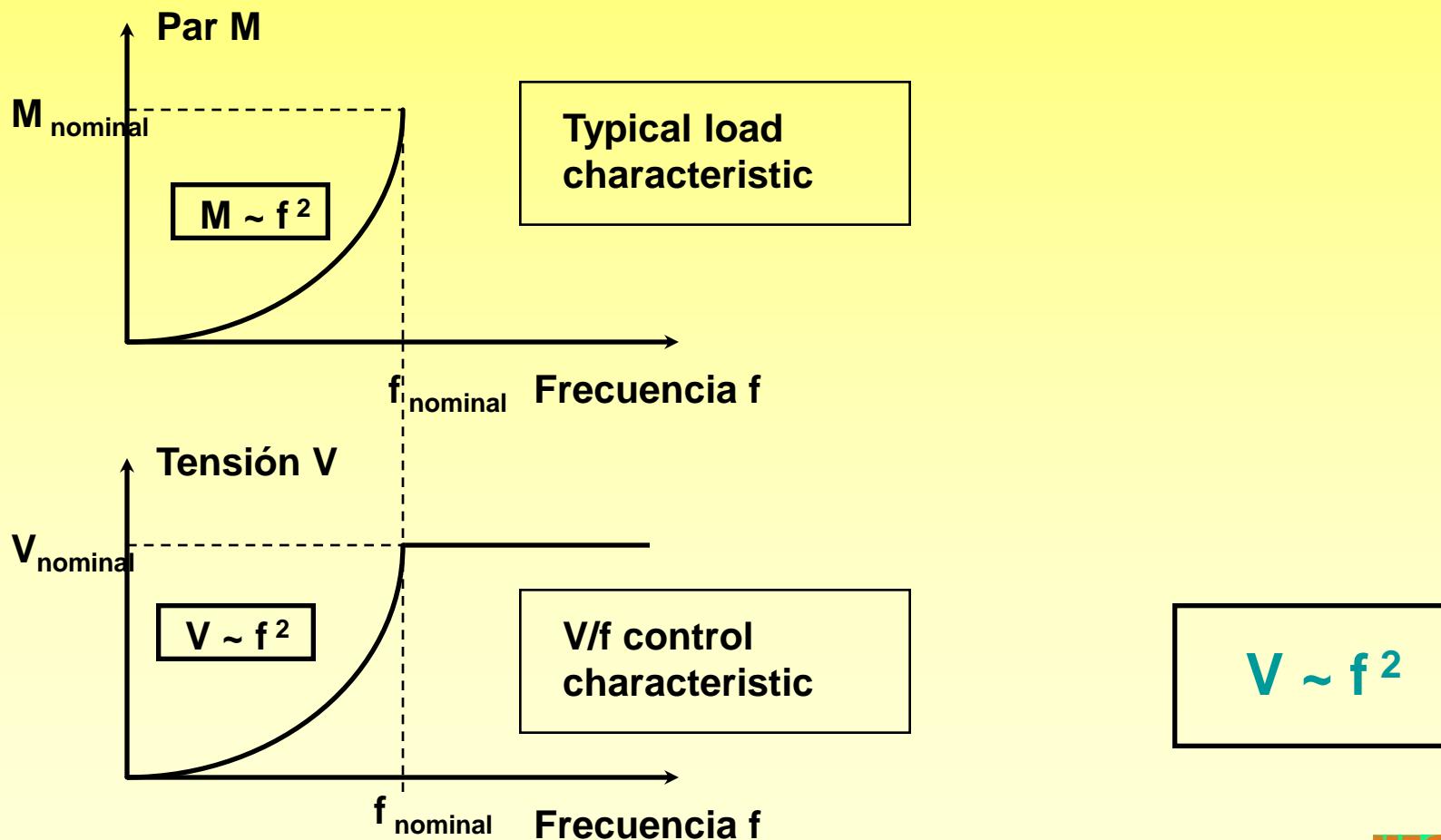
CHOPER DE FRENADO



R_B = Resistencia de frenado
 Bch = Transistor de frenado

El transistor de frenado se activa al detectar un incremento en la tensión del bus de CC, entonces deja pasar la energía hacia La resistencia de frenado.

BOMBAS Y VENTILADORES



13. ARRANCAORES ELECTRONICOS O DE ESTADO SÓLIDO.

Información relacionada.

Los arrancadores de estado sólido son los tipos más nuevos y flexibles de arrancadores de C. A. a potencia reducida. Son muy diferentes de cualquier otro tipo tradicional de arrancadores a tensión reducida, ya que:

1. No requieren de resistores, inductores o autotransformadores externos y tampoco de construcción o alambrado especial del motor.
2. No es necesario el uso de desconexión mecánica para arranque y paro. El control de las desconexiones tiene lugar en un circuito de control de baja potencia, el mantenimiento en este caso es mínimo, ya que no se tienen contactos.
3. No se requieren de enlaces mecánicos para cambiar de baja a alta potencia. Algunos modelos tienen un contactor que dejan fuera al arrancador, conectando directamente el motor a la línea. Lo desconectan hasta que el motor ha alcanzado su velocidad nominal, sin embargo no tienen capacidad para manejar altas corrientes a través del interruptor electrónico de arranque.

En muchos aspectos, los arrancadores de estado sólido de C. A. son similares a los controladores de estado sólido de C. D., ya que en ambos casos se usan rectificadores de silicio controlado (SCR).

En muchos aspectos, los arrancadores de estado sólido de C. A. son similares a los controladores de estado sólido de C. D., ya que en ambos casos se usan rectificadores de silicio controlado (SCR).

La otra diferencia importante es que la mayoría de los arrancadores de estado sólido operan durante el arranque del motor (y algunas veces en el paro) únicamente, es decir, no intervienen en el control de velocidad, ya que no hay control de velocidad después de que el motor ha arrancado. Hay distintos tipos de control para el arranque de motores con arrancadores de estado sólido. Los distintos tipos de cargas arrancan mejor con un modo particular de arranque.

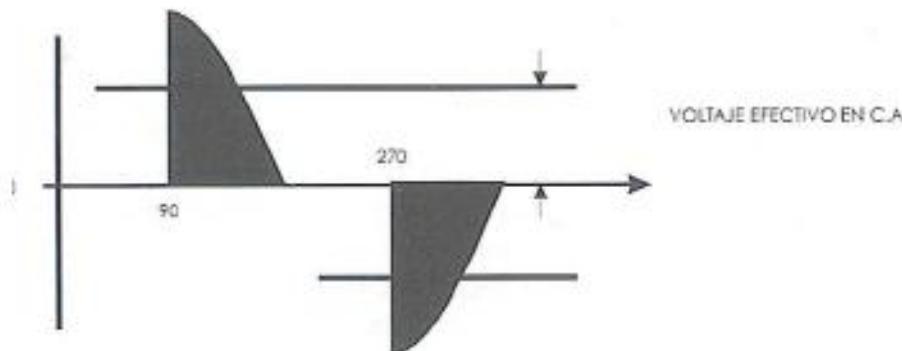
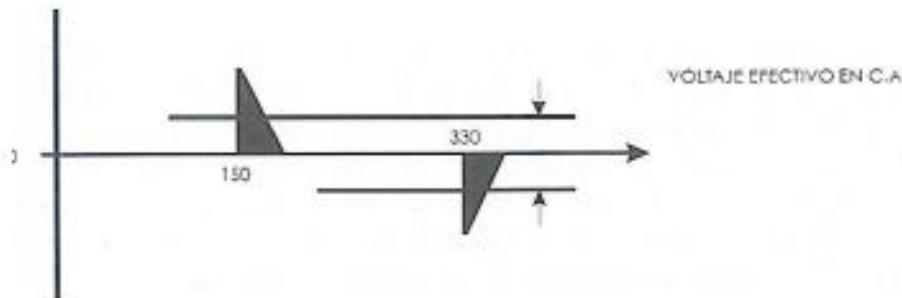
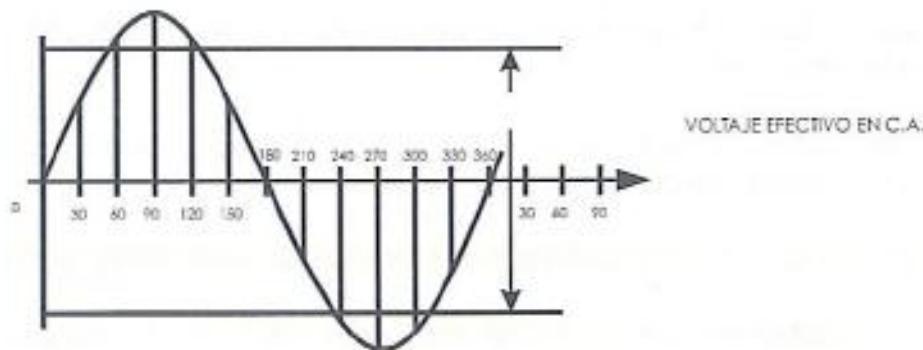
El modo de control equivocado o un ajuste impropio puede causar una operación no satisfactoria y un daño en el motor.

El control de arranque con arrancadores de estado sólido precisan que:

- La corriente del motor depende del voltaje y la velocidad.
- El par mecánico del motor es proporcional al cuadrado del voltaje.

Si un motor se conecta directamente a la alimentación, el voltaje permanece prácticamente sin cambio, no importa qué corriente demande el motor. La corriente en este caso depende casi totalmente de la velocidad. Cuando un motor se energiza a través de un arrancador de estado sólido, el voltaje en el motor es variable, a cualquier velocidad la corriente es proporcional al voltaje.

El voltaje en un arrancador de estado sólido depende del ángulo de disparo en el SCR, como se muestra en la siguiente figura:



ÁNGULO DE DISPARO DEL SCR Y SALIDA DE VOLTAJE

Existe el llamado arranque suave, donde se requiere mayor tiempo durante el cual el motor demanda corriente reducida y produce un par reducido.

Distintos arrancadores usan diferentes modos operacionales:

1. Muchos arrancadores de estado sólido controlan el arranque monitoreando y limitando la corriente al motor. Un transformador de corriente montado en una o más de las líneas de alimentación, envía una señal a los circuitos de control de tiempo del SCR. Cuando la corriente del motor alcanza el límite de corriente preajustado, el ángulo de disparo del SCR aumenta, reduciendo con esto el voltaje de salida y la corriente.

El límite de corriente es usualmente ajustable en el rango de 150-200% a 400-450% de la corriente a plena carga del motor. Se debe nota que el par mecánico de arranque inicial es considerablemente menor que el par mecánico a plena carga.

2. Para estar seguro que el motor arranca, algunos arrancadores de estado sólido proporcionan una rampa de corriente en el tiempo entre dos puntos de ajuste. El rango típico de tiempo es de 1 a 30 segundos.

3. Algunos arrancadores de estado sólido con corriente de rampa proporcionan un breve pulso inicial de corriente a su límite más alto. Esto permite asegurar que las cargas con alta fricción estática siempre arranquen en forma inmediata. Despues del pulso, la rampa "brinca" del límite inferior.

4. Algunos arrancadores de estado sólido monitorean y controlan el voltaje del motor. En forma típica, elevan el voltaje desde cero o desde un valor inicial de paso de voltaje hasta algún porcentaje del voltaje de línea.

Un voltaje reducido produce una corriente reducida y un par mecánico reducido también: A cualquier velocidad, la reducción de corriente es proporcional a la reducción del voltaje. El porcentaje de reducción del par mecánico es proporcional al cuadrado de la reducción del voltaje, así $\frac{1}{2}$ del voltaje produce $\frac{1}{4}$ del par mecánico, $\frac{2}{3}$ del voltaje producen $\frac{4}{9}$ del par mecánico, etc.

La rampa de tiempo es generalmente ajustable. Si el motor tiene que arrancar con una carga de alta inercia, la corriente debe ser alta, si la rampa es breve. Una rampa más larga da al motor más tiempo para acelerar la carga y reducir la corriente.

5. Los tipos más sofisticados de controles para arrancadores de estado sólido, usan un tacómetro para monitorear la aceleración real del motor. Por medio de circuitos de retroalimentación, se compara esta aceleración con una rampa de aceleración lineal preajustada.

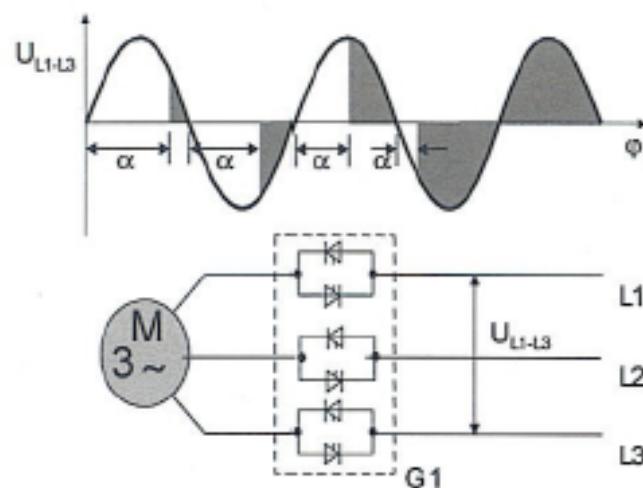
Información básica

¿Cuál es el principio básico de un arrancador suave?

Los arrancadores suaves limitan la corriente y el par mecánico de arranque. El esfuerzo mecánico así como la caída en el voltaje de línea son reducidos. El voltaje en el motor es reducido usando control de fase y se incrementa suavemente hasta el voltaje de línea en un tiempo seleccionable. El arranque y frenado suaves garantizan el mínimo esfuerzo en los dispositivos conectados y aseguran operaciones suaves.

Arrancadores Suaves

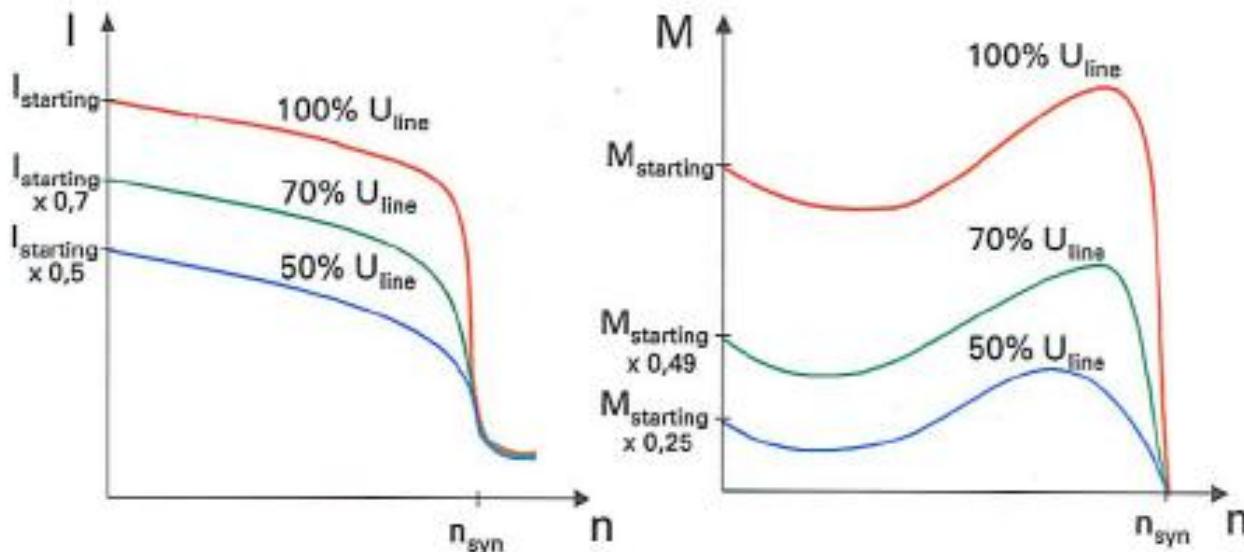
Los arrancadores de estado sólido son utilizados cuando se requiere un arranque suave y lento. En lugar de operarlos directamente a plena tensión, se arrancan con aumentos graduales de voltaje mediante el control del ángulo de disparo como se muestra en la siguiente figura. Los arrancadores suaves evitan los disturbios de la red eléctrica y picos de corriente así como los esfuerzos mecánicos que causan desgaste al motor y la máquina que se acciona es decir la máquina impulsada por el motor.



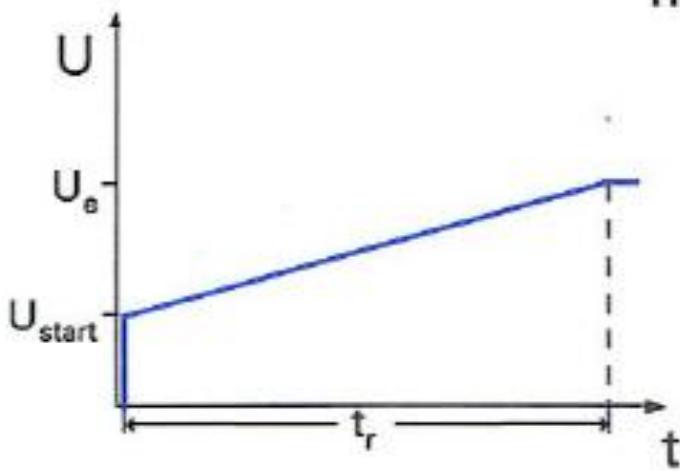
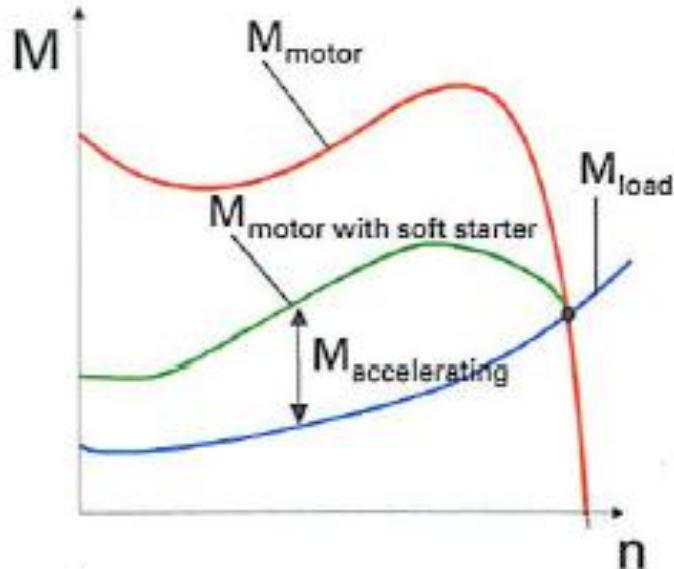
Principio del control de fase usando elementos semiconductores para arrancadores suaves.

Parada suave. Cuando la máquina es desconectada, se provoca en el motor una parada repentina con un determinado torque opuesto. Para prevenir que los objetos en una banda transportadora se caigan, por ejemplo, una parada suave es posible.

Los arrancadores suaves están adaptados para instalaciones y procesos industriales, ofrecen la mejor opción garantizando arranques optimizados de motores y la perfecta funcionalidad en cualquier aplicación.



Características típicas de la corriente y el par mecánico o torque cuando se usan arrancadores suaves.



Torque carga/motor y voltaje típico en las terminales del motor cuando el motor es arrancado con un arrancador suave.

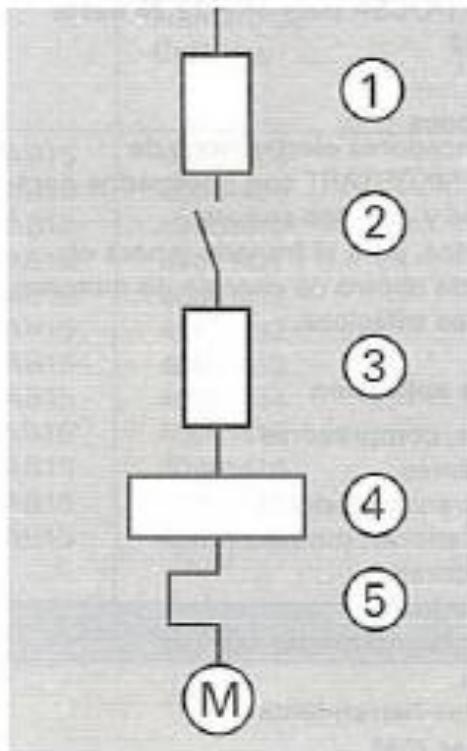
Ejemplo de las características del arrancador suave SIEMENS SIKOSTART 3RW34

El arrancador SIEMENS SIKOSTART 3RW34 permite arranques y paradas controladas. Se caracteriza por su control en las tres fases y tiristores dimensionados para operación continua. Puede ser operado alternativamente usando un contactor de puenteo externo (bypass) controlado por un contactor auxiliar integrado.

El arrancador SIKOSTART 3RW34 puede ser usado casi en cualquier aplicación, por ejemplo:

- Ventiladores.
- Bombas.
- Compresores.
- Bandas transportadoras.
- Máquinas textiles.
- Centrífugas.
- Mezcladores.

Para su operación, ya no se requiere de mayores conexiones; solo la alimentación de 440 V ó 220 V al interruptor termomagnético, y del relevador térmico de sobrecarga bimetálico IEC al motor.



- ① Fusible principal o interruptor termomagnético
- ② Contactor (opcional)
- ③ Fusible sitor o silice (opcional)
- ④ Sikostart
- ⑤ Relevador bimetalico

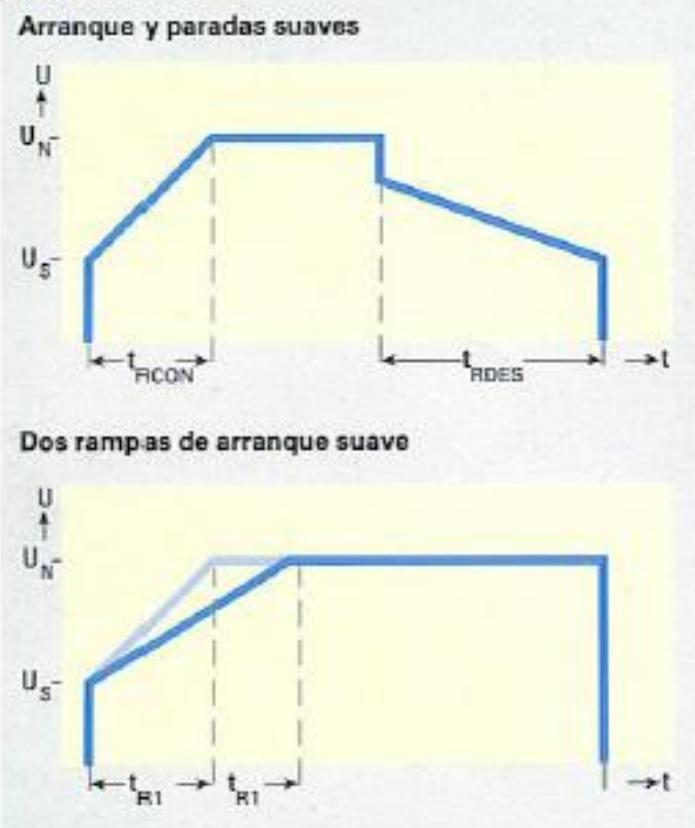
¿Cómo se ajustan los parámetros de un arrancador suave?

El tiempo y voltaje de arranque así como el tiempo de frenado pueden ajustarse fácilmente mediante potenciómetros. Los valores pueden ser finamente ajustados con los rangos usuales.

Esto también aplica para arrancadores suaves con protección de sobre – velocidad: la corriente nominal del motor, clase de disparo, y límite de corriente pueden ser ajustados por medio de potenciómetros. El amplio rango de funciones de la gama de arrancadores suaves de fabricantes líderes en estos equipos es rápidamente establecido en un ambiente amigable usando un teclado con menú gráfico, esto significa que es extremadamente simple la puesta en marcha y la solución de problemas en los dispositivos.

Ejecuciones para una amplia gama de aplicaciones.

Existen los arrancadores electrónicos poseen dos ejecuciones diferentes. La ejecución estándar contiene las funciones de arranque y parada suaves con los tres parámetros de ajuste (tiempo de arranque t_{RCON} , tensión de arranque U_s y tiempo de parada t_{RDSE}). Una variante especial para la regulación de motores Dahlander (motores de polos consecuentes o de polos commutables) posee además dos funciones de arranque suave. Así se puede seleccionar una de las dos por medios de entradas separadas. Un potenciómetro permite ajustar diferentes tiempos de arranque t_{R1} y t_{R2} . La tensión de arranque U_s es válida para ambas funciones.



BENEFICIOS DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA

- ✓ Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- ✓ Se puede programar un arranque suave, parada y freno (funciones de arrancador progresivo).
- ✓ Amplio rango de velocidad, par y potencia. (velocidades continuas y discretas).
- ✓ Bucles de velocidad.
- ✓ Puede controlar varios motores.
- ✓ Factor de potencia unitario.
- ✓ Respuesta dinámica comparable con los drivers de DC.
- ✓ Capacidad de by-pass ante fallos del variador.
- ✓ Protección integrada del motor.
- ✓ Marcha paso a paso (comando JOG).

SELECCIÓN DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD

Para definir el equipo más adecuado para resolver una aplicación de variación de velocidad, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos :

- **Tipo de carga:** Par constante, par variable, potencia constante, cargas por impulsos.
- **Tipo de motor:** De inducción rotor jaula de ardilla o bobinado, corriente y potencia nominal, factor de servicio, rango de voltaje.
- **Rangos de funcionamiento:** Velocidades máximas y mínimas. Verificar necesidad de ventilación forzada del motor.
- **Par en el arranque:** Verificar que no supere los permitidos por el variador. Si supera el 170% del par nominal es conveniente sobredimensionar al variador.
- **Frenado regenerativo:** Cargas de gran inercia, ciclos rápidos y movimientos verticales requieren de resistencia de frenado exterior.

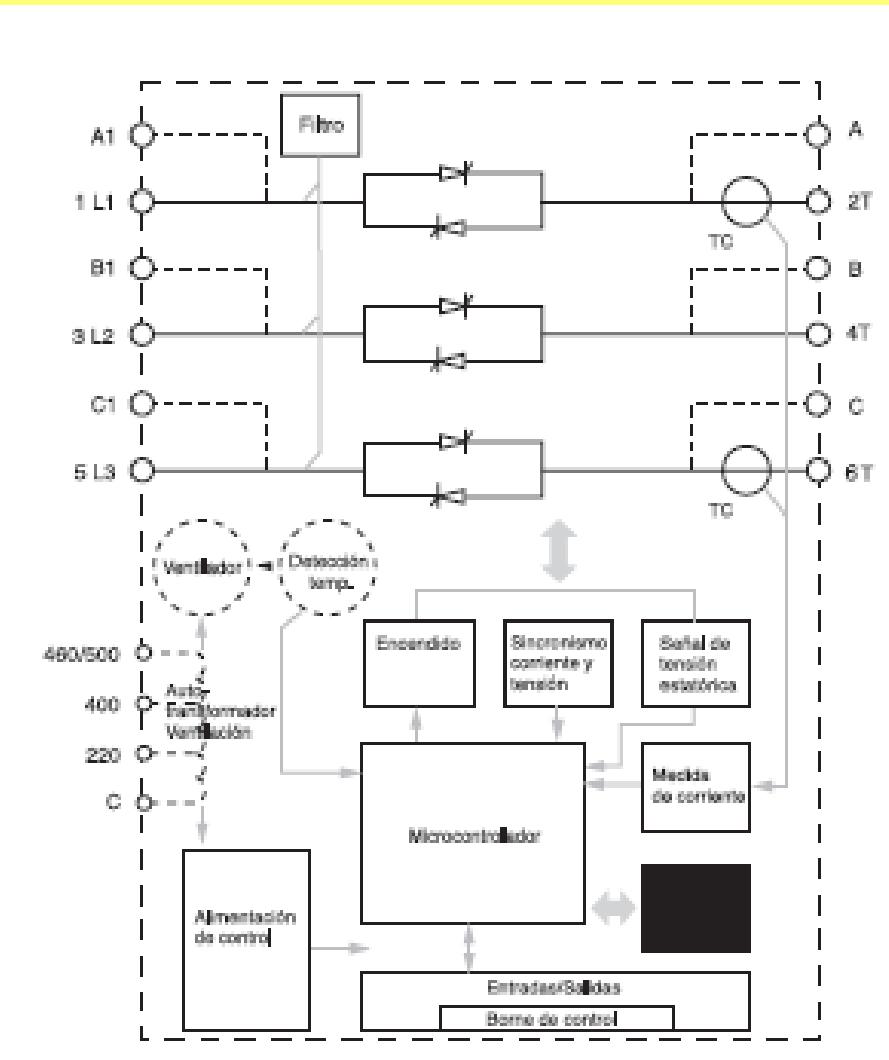
- **Condiciones ambientales:** Temperatura ambiente, humedad, altura, tipo de gabinete y ventilación.
- **Aplicación multimotor:** Prever protección térmica individual para cada motor. La suma de las potencias de todos los motores será la nominal del variador.
- **Consideraciones de la red:** Microinterrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible, transformadores de aislación.
- **Consideraciones de la aplicación:** Protección del motor por sobretemperatura y/o sobrecarga, contactor de aislación, bypass, rearranque automático, control automático de la velocidad.
- **Aplicaciones especiales:** Compatibilidad electromagnética, ruido audible del motor, bombeo, ventiladores y sopladores, izaje, motores en paralelo, etc.

ARRANCADOR PROGRESIVO

Se recomienda utilizar un arrancador progresivo cuando sea necesario :

- Reducir los picos de corriente y eliminar las caídas de tensión en la línea,
- Reducir los pares de arranque,
- Acelerar, desacelerar o frenar suavemente, para la seguridad de las personas u objetos transportados,
- Arrancar máquinas progresivamente, en especial aquellas de fuerte inercia,
- Adaptar fácilmente el arrancador a las máquinas especiales,
- Proteger al motor y a la máquina con un sistema de protección muy completo.
- Supervisar y controlar el motor en forma remota.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO



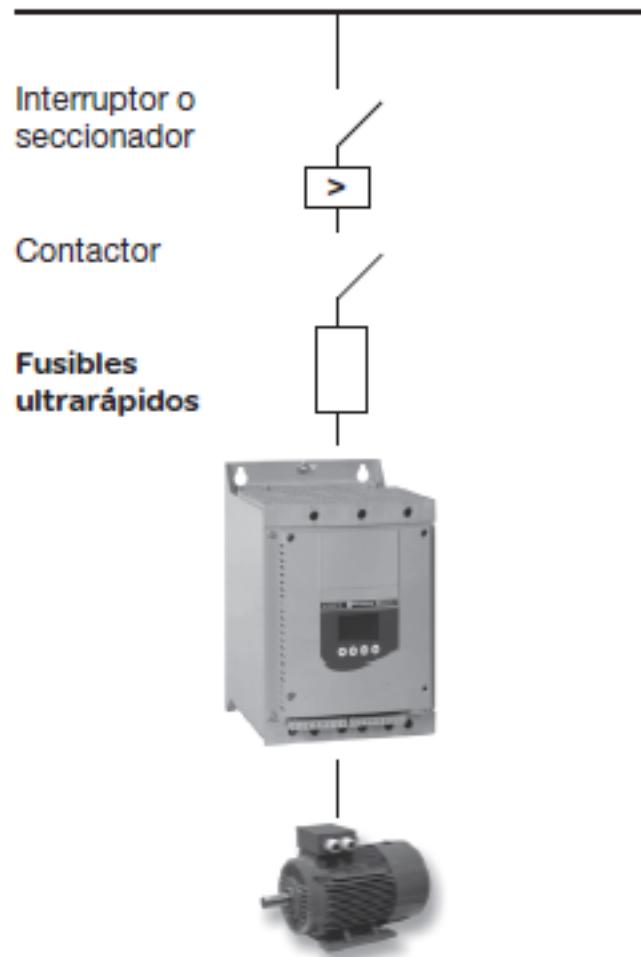
Son equipos electrónicos tiristorizados que, mediante el control de las tres fases del motor asincrónico, regulan la tensión y la corriente durante su arranque y la parada, realizando un control efectivo del par. Los sensores de corriente incorporados le envían información al microprocesador, para regular el par ante las diferentes condiciones de carga y proteger al motor de sobrecargas.

Principales aplicaciones

Los arrancadores progresivos son de amplio uso en sistemas de bombeo, compresores, transportes horizontales, ventiladores y centrífugas.

Círculo recomendado

La coordinación tipo 2 se logra anteponiendo un interruptor manual, fusibles ultrarrápidos para proteger a los tiristores y un contactor, garantizando de esta forma todas las condiciones de seguridad para el operador y para los aparatos involucrados, ya que la protección térmica está integrada en el arrancador.



Variadores de velocidad

Altivar 11



ATV 11HU18M2E

Para motores asincrónicos de 0,18 a 2,2 kW

Motor	Red	Altivar 11			
Potencia indicada en placa	Corriente de linea máxima	Corriente de salida permanente	Corriente transitoria máxima	Potencia disipada a carga	Referencia nominal
kW	A	A	A	W	
Tensión de alimentación monofásica 200...240 V 50/60 Hz					
0.18	2.9	1.1	1.6	12	ATV11HU05M2E
0.37	5.3	2.1	3.1	20.5	ATV11HU09M2E
0.55	6.3	3	4.5	29	ATV11HU12M2E
0.75	8.6	3.6	5.4	37	ATV11HU18M2E
1.5	14.8	6.8	10.2	72	ATV11HU29M2E (4)
2.2	20.8	9.6	14.4	96	ATV11HU41M2E (4)

Potenciómetro

Designación	Referencia
Un potenciometro de 2,2 kOhms, 3 W, IP65, con graduación para referencia de velocidad.	SZ1-RV1202

Arrancadores suaves

Altistart 01



ATS 01

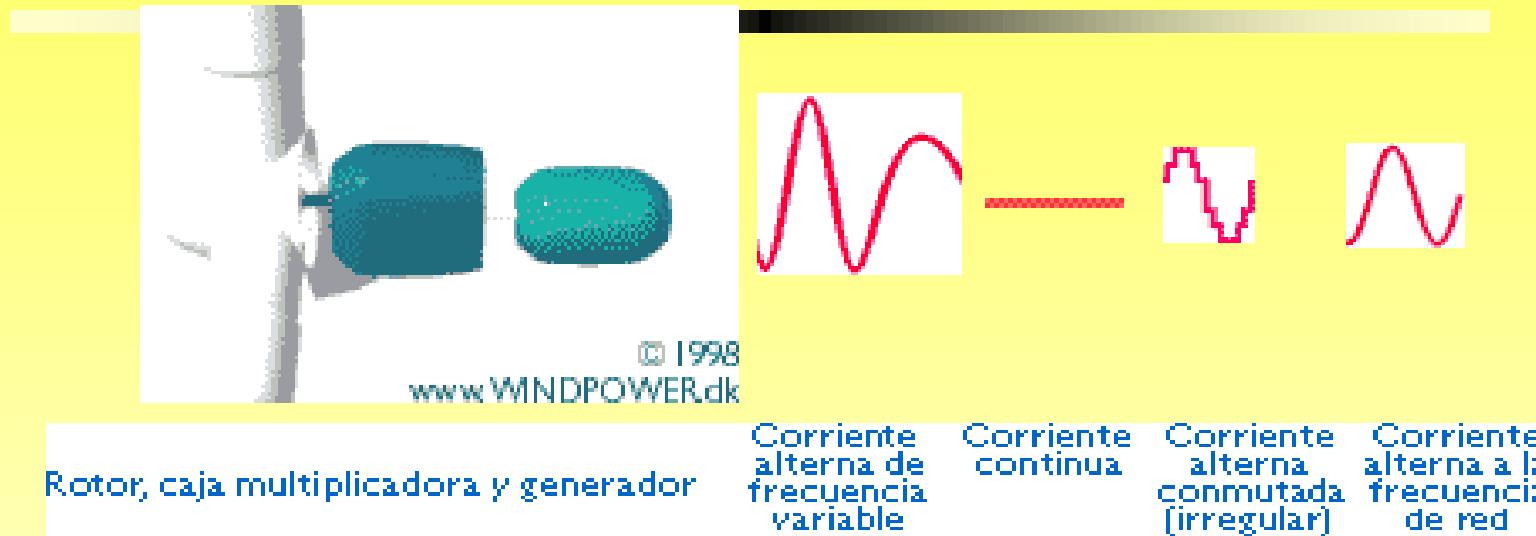
Arrancador suave para motores de 0,37 a 5,5 kW

Motor	Arrancador				
Potencia motor	Potencia	Corriente	Referencia		
Trifásico	Monofásico	dissipada	nominal		
400 V	230 V				
kW	kW	W (1)	W (2)	A	
0,37 a 1,1	0,37	4	19	3	ATS 01N1 03FT
1,5 y 2,2	0,75	1	31	6	ATS 01N1 06FT
3 y 4	1,1	1	46	9	ATS 01N1 09FT
5,5	1,5	1	61	12	ATS 01N112FT

Motor Asíncrono o de Inducción:

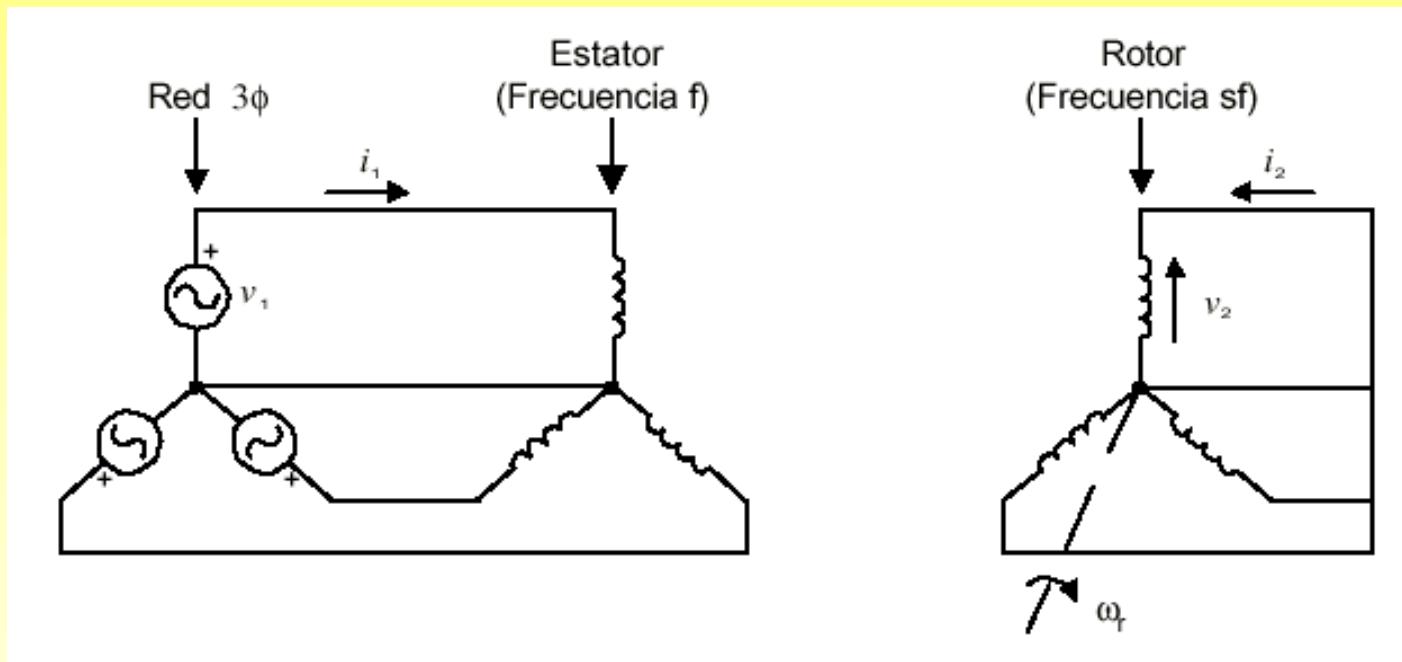
Funcionamiento como generador

www.windpower.org



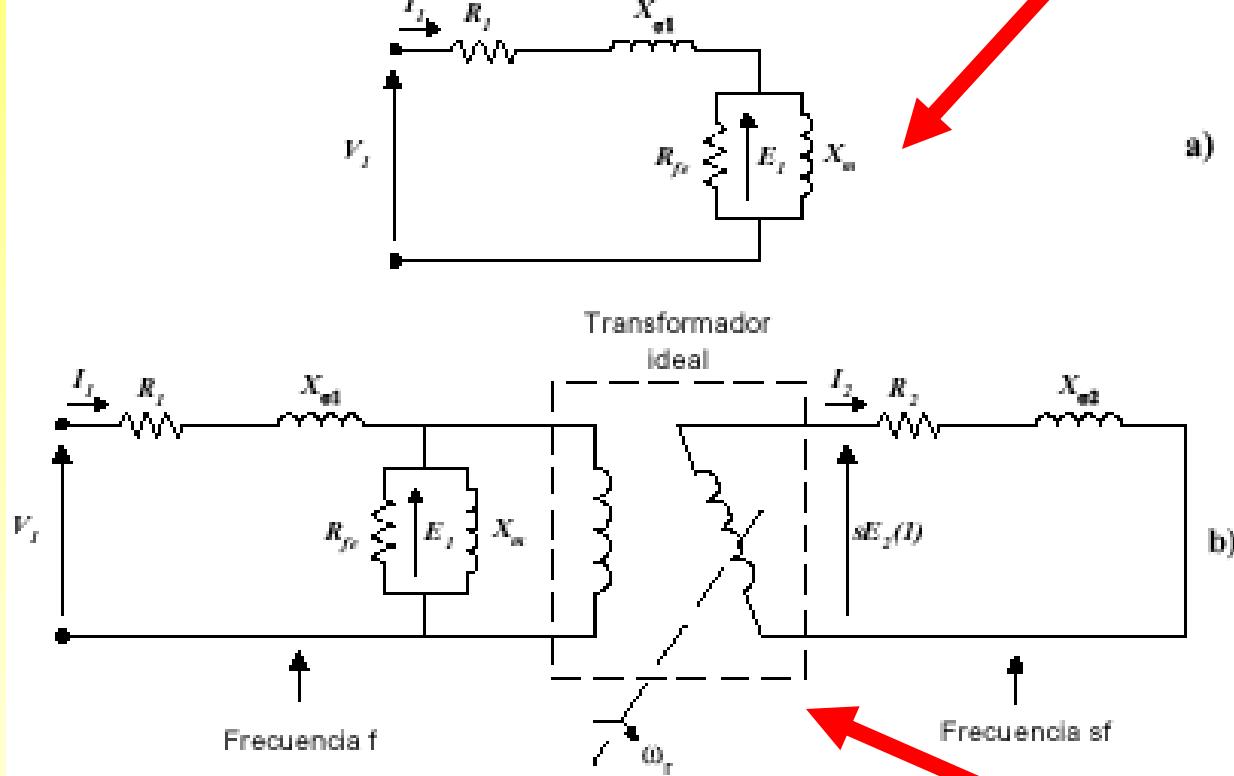
Si hacemos girar el rotor de forma manual a una velocidad superior a la velocidad síncrona del generador, en ese caso **el rotor** se mueve más rápidamente que el **campo magnético giratorio del estator**, lo que significa que, una vez más, el estator inducirá una gran corriente en el rotor. Cuanto más rápidamente hagamos girar el rotor, mayor será la **potencia transferida al estator** en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica

Máquina de Inducción Conectada a la Red Trifásica



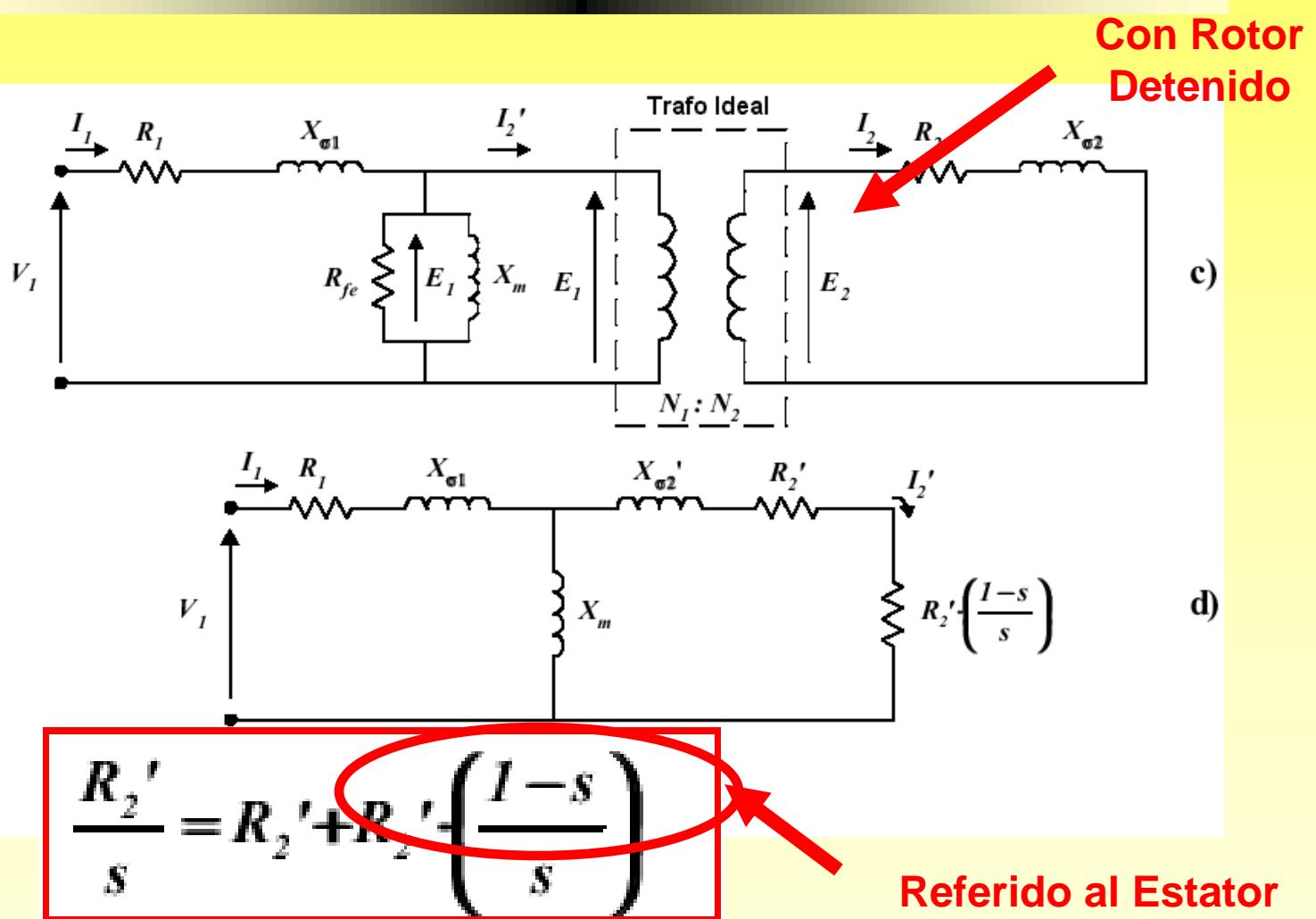
Circuito Equivalente por Fase

Estator



Con Rotor Girando

Circuito Equivalente por Fase



Deslizamiento (S)

- Resistencia Equivalente: $\frac{R2'}{S} = \frac{R2'}{S} + \frac{R2'(1-S)}{S}$

- Deslizamiento: $S = \frac{(W_{cg} - W_r)}{W_{cg}}$

- Velocidad Campo Giratorio: W_{cg}

- Velocidad Rotor: W_r

-Rotor detenido ($W_r=0$):

$$\Rightarrow S=1 \Rightarrow (R2')/S=R2'$$

-Rotor a Veloc. del Campo Giratorio ($W_r=W_{cg}$):

$$\Rightarrow S=0 \Rightarrow (R2')/S=\text{Grande!}$$

Problema!

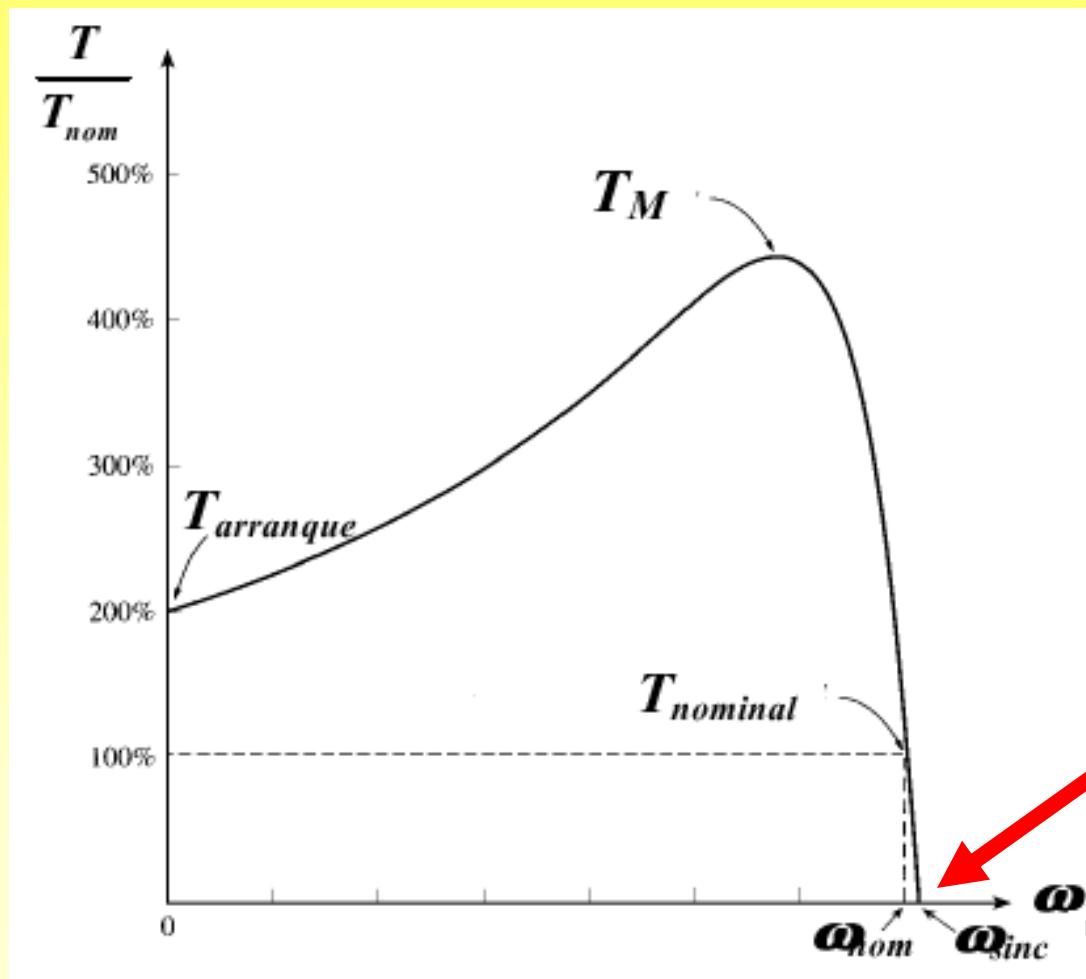
- Con $S=1$ ($W_r = 0$) $\Rightarrow \frac{R_2'}{S} = R_2'$

Iarranque = 5*Inomial

=> Hay que tomar medidas especiales para las sobrecorrientes

Solución: Partidores Suaves

Característica Torque Velocidad



Variación de Velocidad

La velocidad varía, variando la velocidad del campo giratorio

=>

Variar la frecuencia de tensiones y corrientes en el estator

$$T_{el} = K * W_2 * (V_1 / W_1)^2$$

Con Flujo Constante:

$$g = V_1 / W_1 = \text{cte.}$$

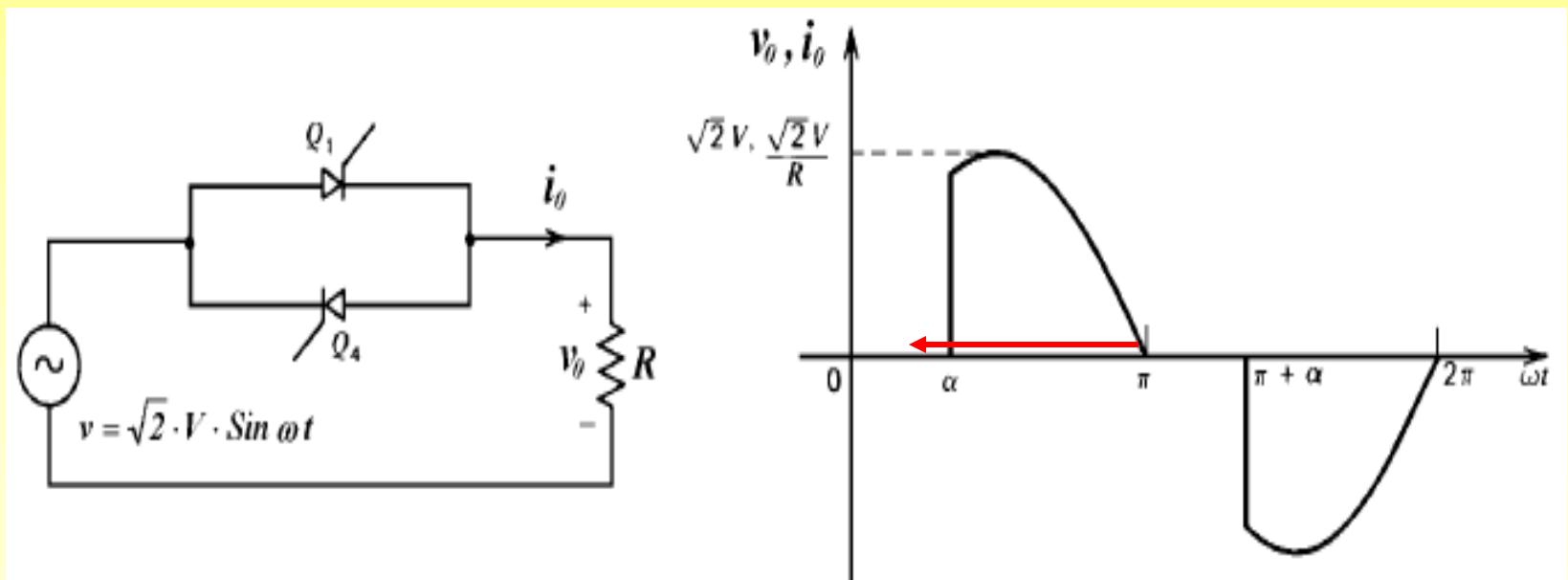
$$\Rightarrow T_{el} = K' * W_2$$

Arrancador Suave

- Soluciona las Sobrecorrientes, alimentando al motor al momento de partir, con tensión reducida
- Para lo anterior usualmente se utilizan diversos semiconductores: tiristores, transistores, etc.

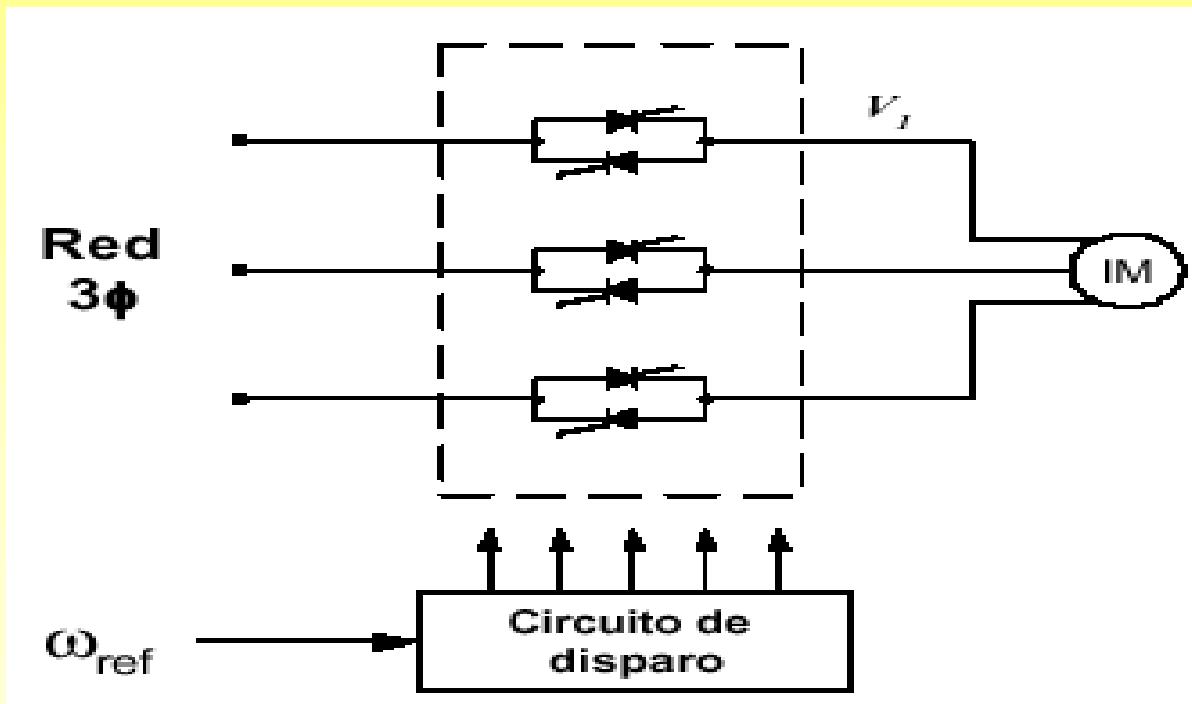
Arrancador Suave

- Variación de la tensión en la carga mediante semiconductores.



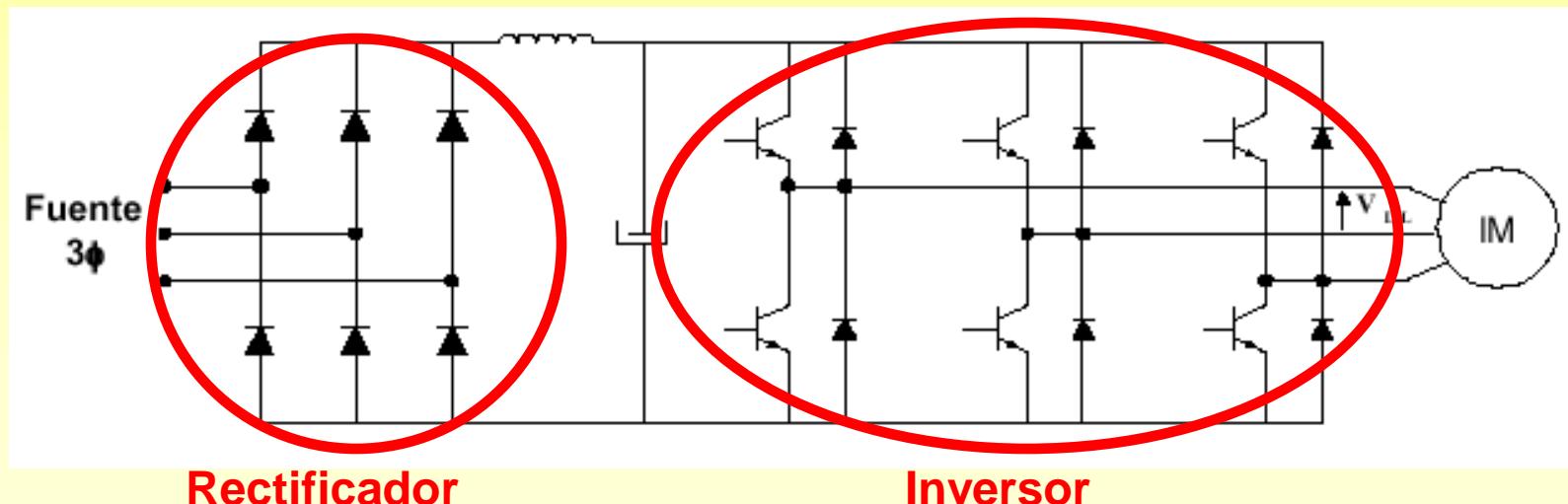
Arrancador Suave

- Arrancador Suave Trifásico



Variador de Frecuencia

- Entrega al motor una tensión alterna de amplitud y frecuencia variable.
- Lo anterior implica el uso de un inversor



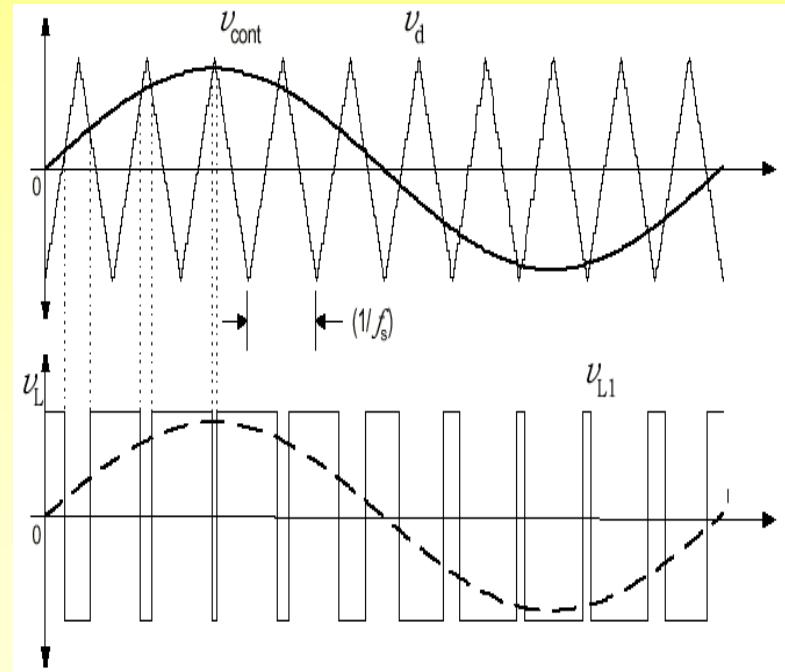
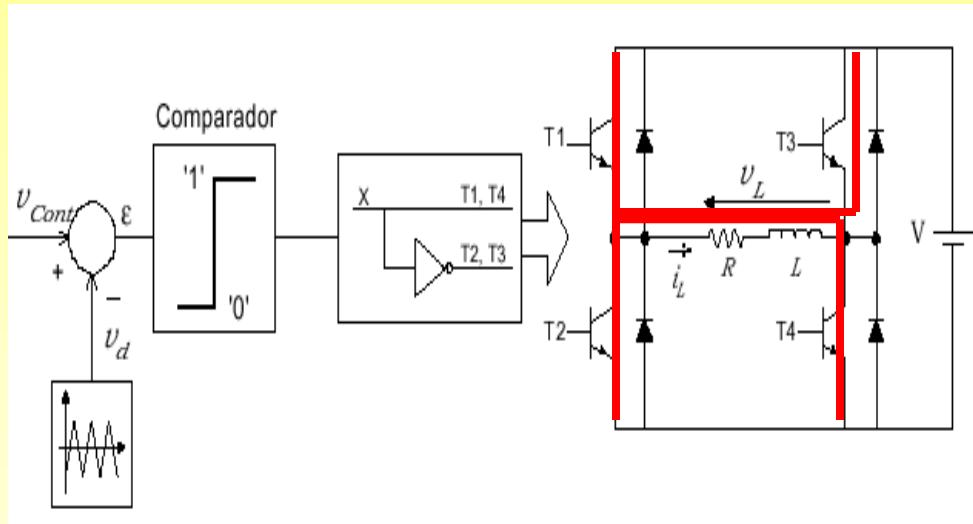
Variador de Frecuencia

¿Cómo se logra V y f variables?

- Inversor con Modulación PWM.
- Inversor con Control por Histéresis.

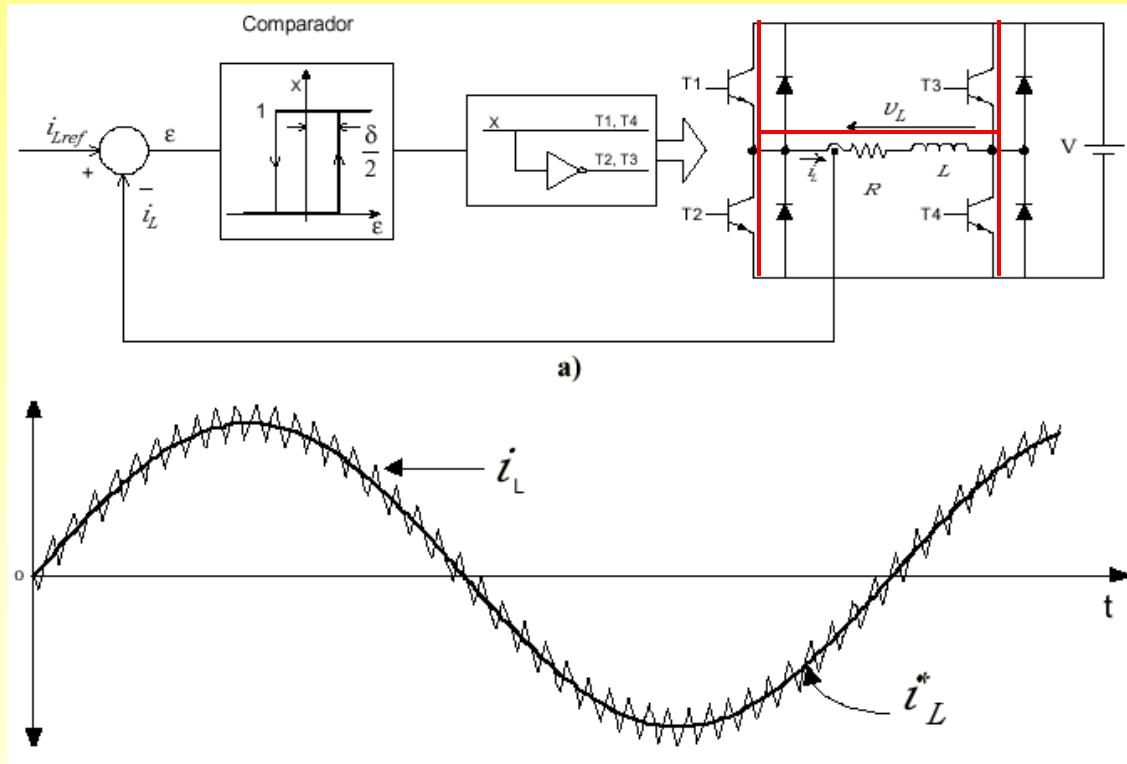
Variador de Frecuencia

1.-Inversor Monofásico con Modulación PWM.

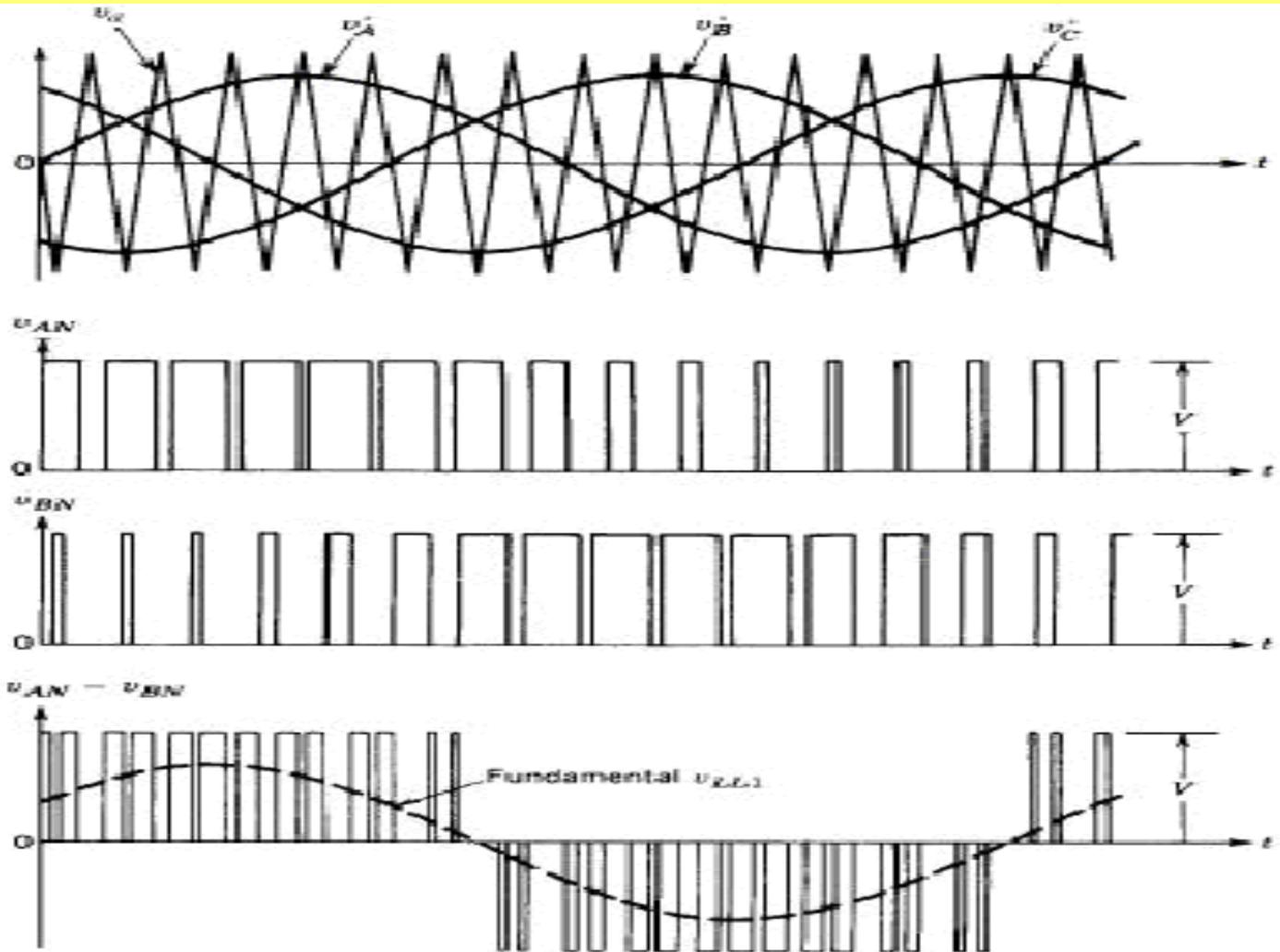


Variador de Frecuencia

2.-Inversor Monofásico con Control por Histéresis.

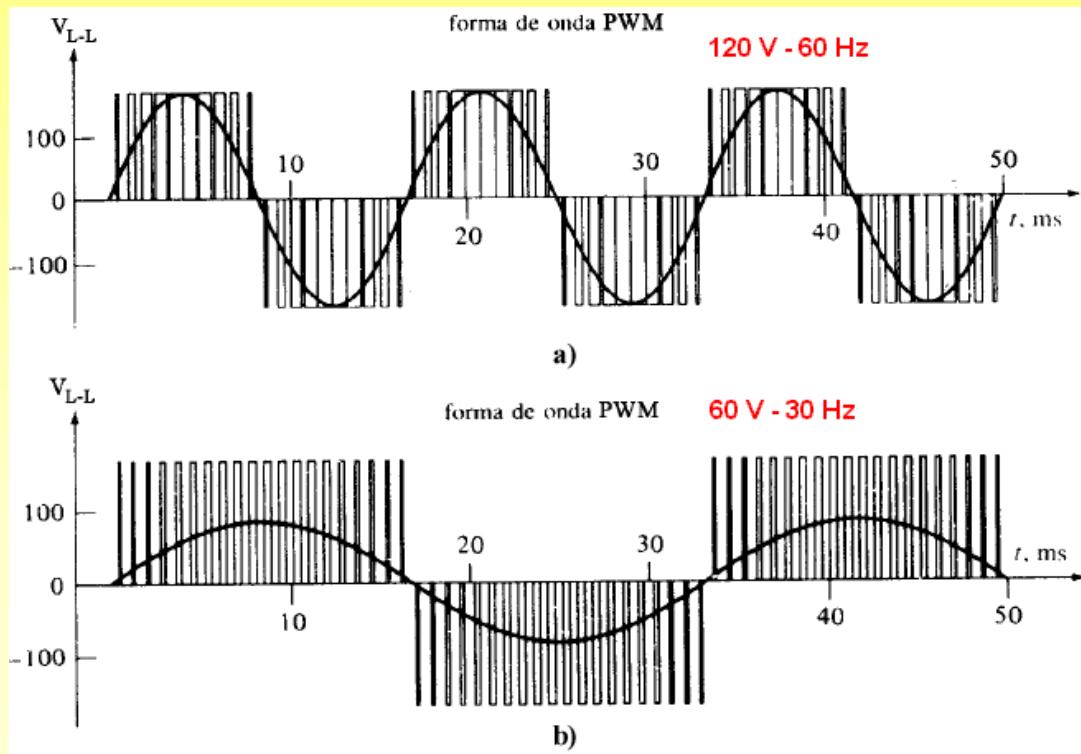


Variador de Frecuencia

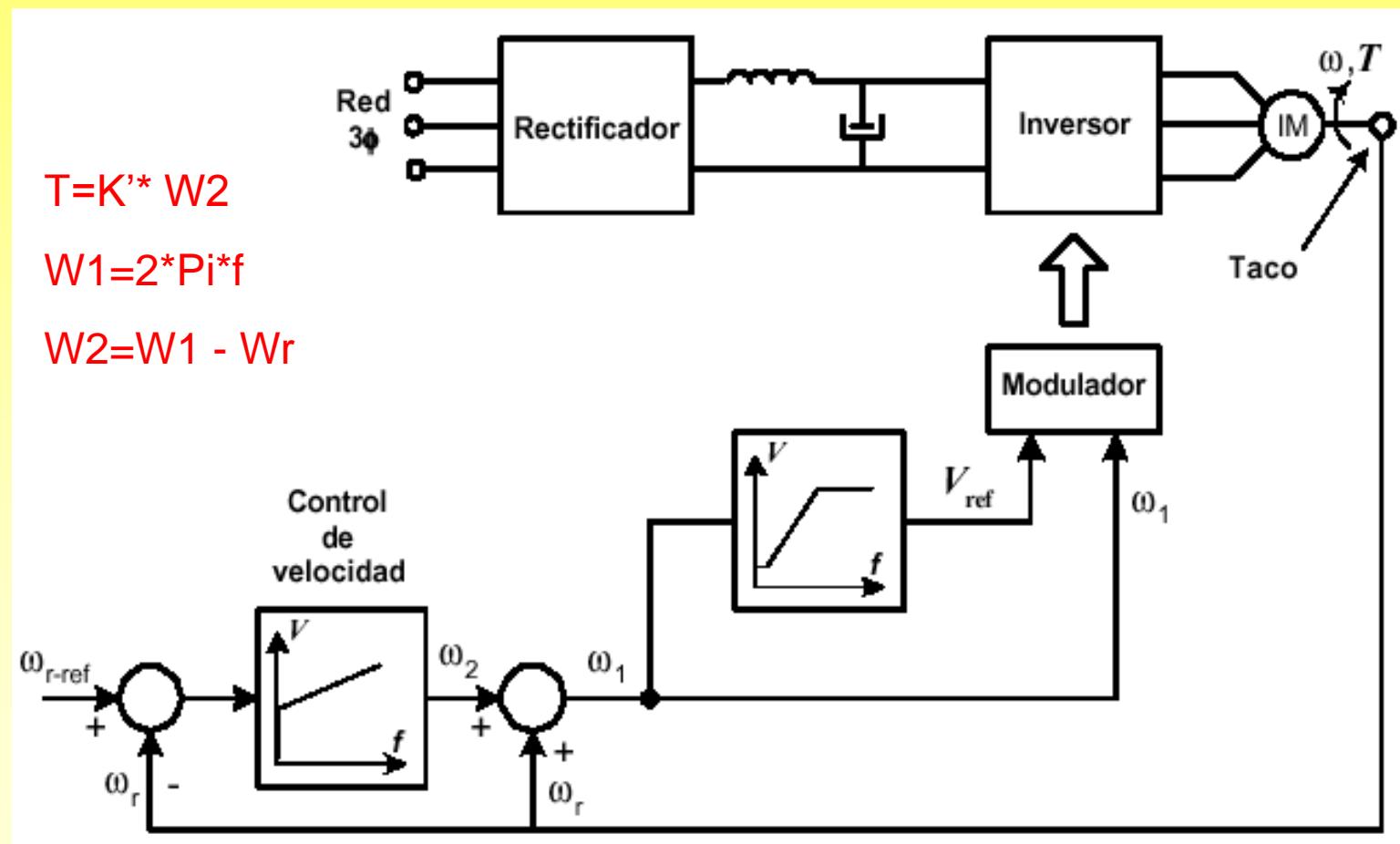


Variador de Frecuencia

Generación de tensión y Frecuencia Variables



Control de Velocidad



Observación

- En general podrían usarse sólo variadores de frecuencia para solucionar el problema de la partida (sobrecorriente) de los motores.
- Lo anterior, no se hace en la práctica dado el costo mayor de un variador de frecuencia con respecto al arrancador suave.

Aplicaciones

- Minería, Molienda de Cobre.
- Laminadoras, prensas.
- Bombas.
- Transporte:
 - Ascensores, Escaleras Mecánicas.
 - Trenes, Camiones.
 - Autos.

Control de motores de inducción

Control escalar

Control vectorial

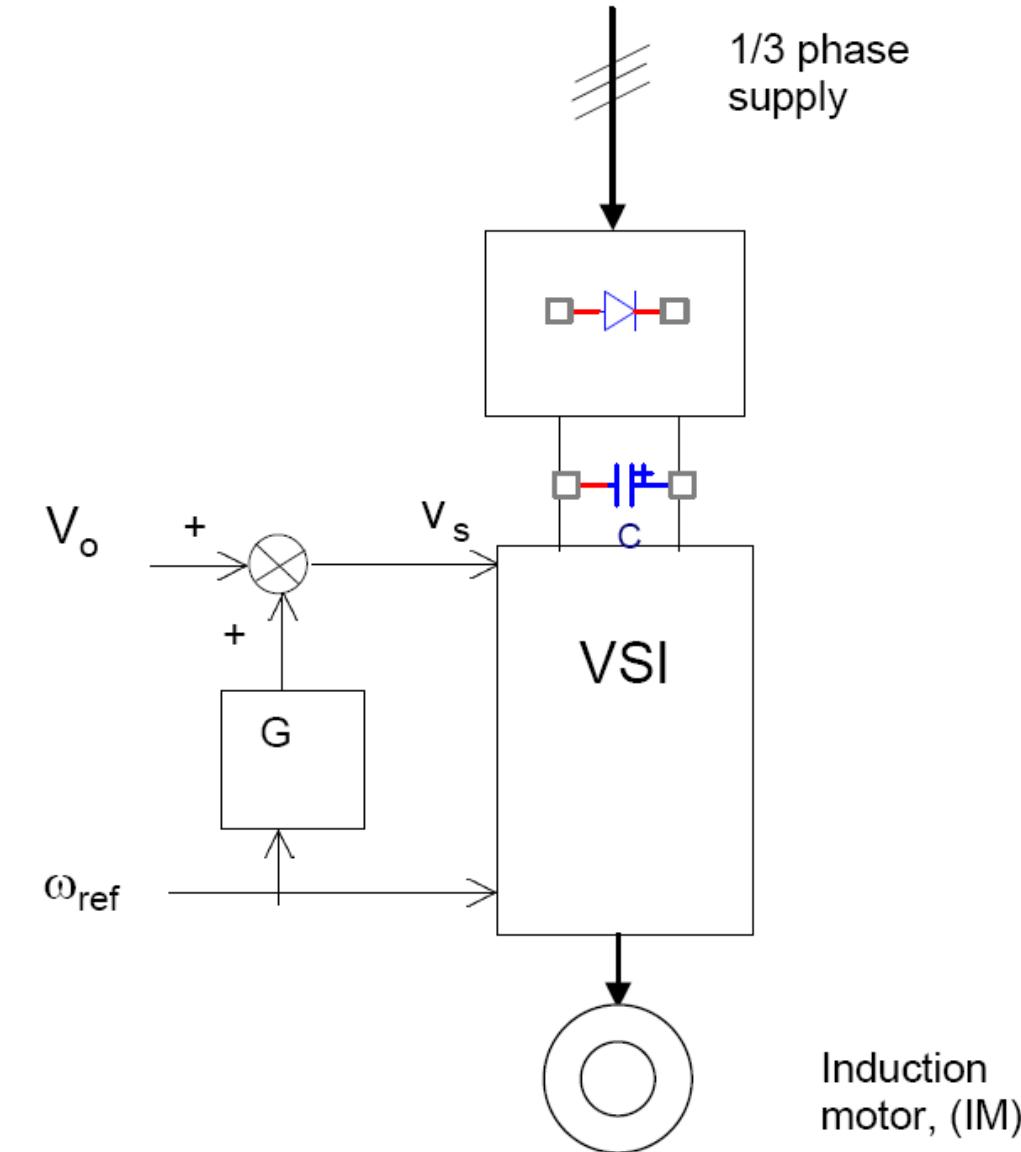
- **Control escalar**
 - Se regula la tensión y la frecuencia del estator o control volt/hertz.
 - Regulación del flujo por la corriente inyectada en el estator en función de la frecuencia de deslizamiento rotórica w_2 .
- **Control vectorial**
 - Control orientado al campo (Field Oriented Control, **FOC**), que puede ser indirecto, o directo.
 - Control de torque directo (Direct Self Control, **DSC**, Direct Torque Control, **DTC**)

Los motores de inducción se pueden clasificar en dos categorías importantes, basadas en sus aplicaciones:

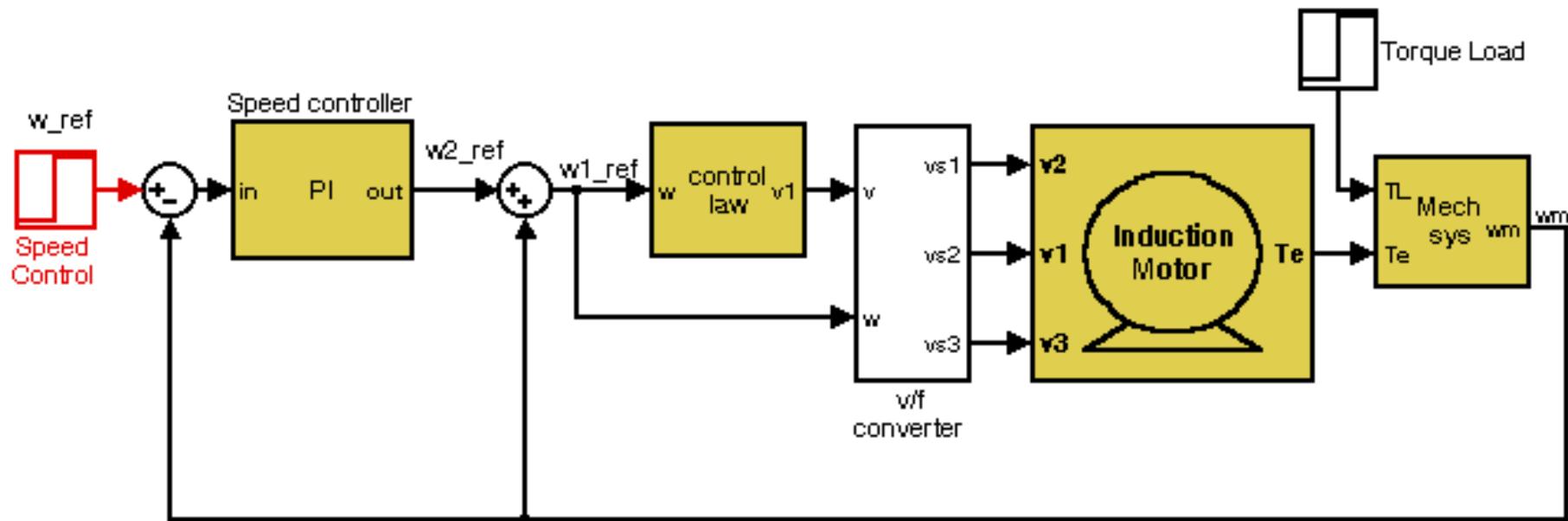
- 1) **ASD** (Adjustable-Speed Drives). Una aplicación importante en estos accionadores es regular la velocidad de ventiladores, compresores, bombas, tracción eléctrica, incluidos vehículos híbridos, y otros procesos de control industrial.
- 2) **Servo Drives**. Corresponde a controles sofisticados que pueden usar como servo drives en máquinas herramientas, robótica y también puede emular las características de un motor de d.c. y un motor brushless de d.c.

Control escalar

Variador Volts/Hz en lazo abierto



Control Volts/Hz en lazo cerrado con regulación de deslizamiento

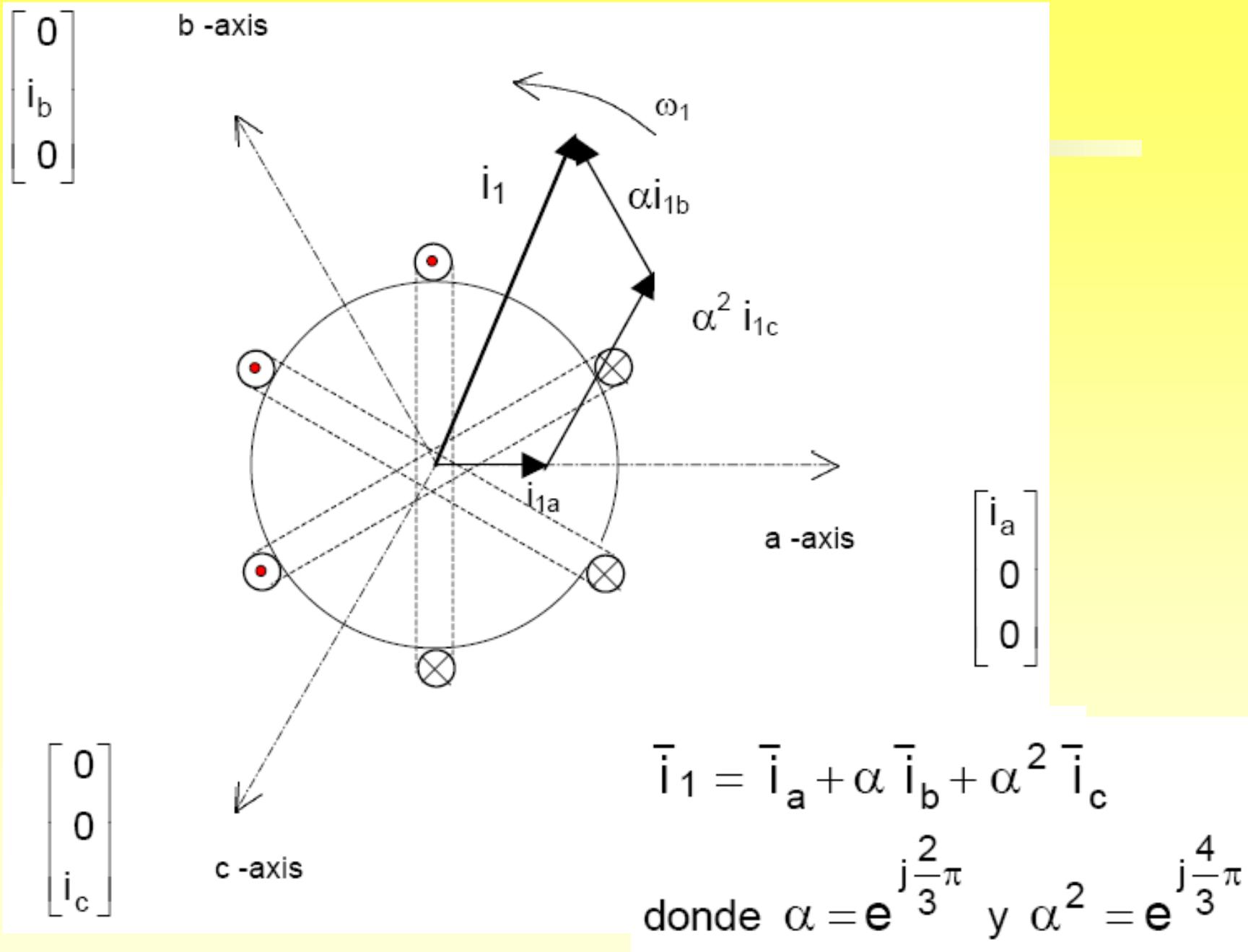


Control vectorial

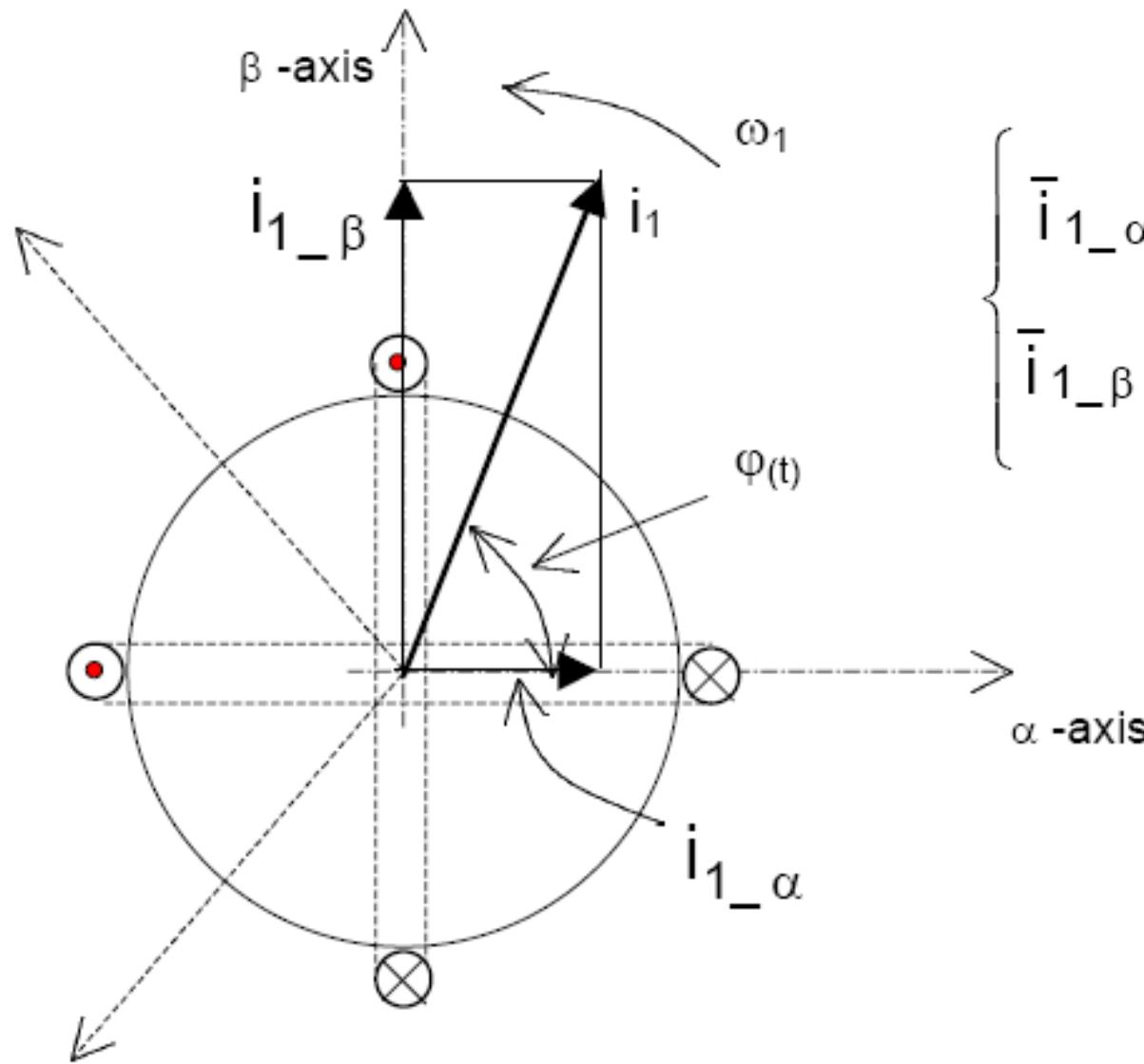
Control vectorial orientado al campo FOC de Blaschke

El control escalar no tiene buen comportamiento dinámico.

- ✓ *El control vectorial provee el mismo control desacoplado de flujo y torque el cual es inherentemente posible en un motor de DC.*
- ✓ El principio del control orientado al campo de corriente puede ser explicado en referencia con las características de un motor de DC.

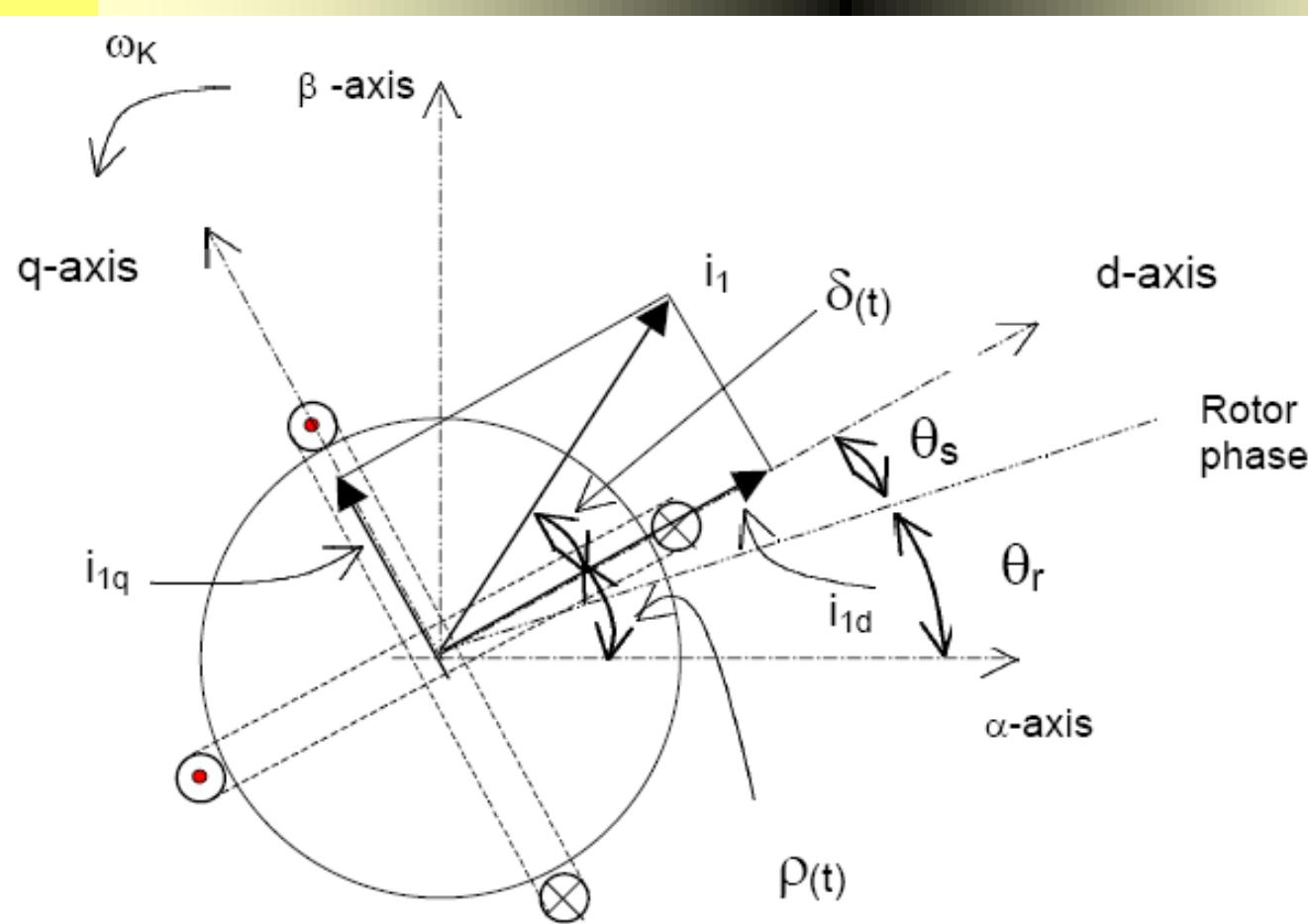


Proyección (a, b, c) a la proyección en los ejes (α , β) (Transformación Clarke).



$$\begin{cases} \bar{i}_{1_\alpha} = \bar{i}_a \\ \bar{i}_{1_\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{i}_a + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{i}_b \end{cases}$$

Proyección del sistema de ejes (α, β) al sistema (d, q) (transformación Park).



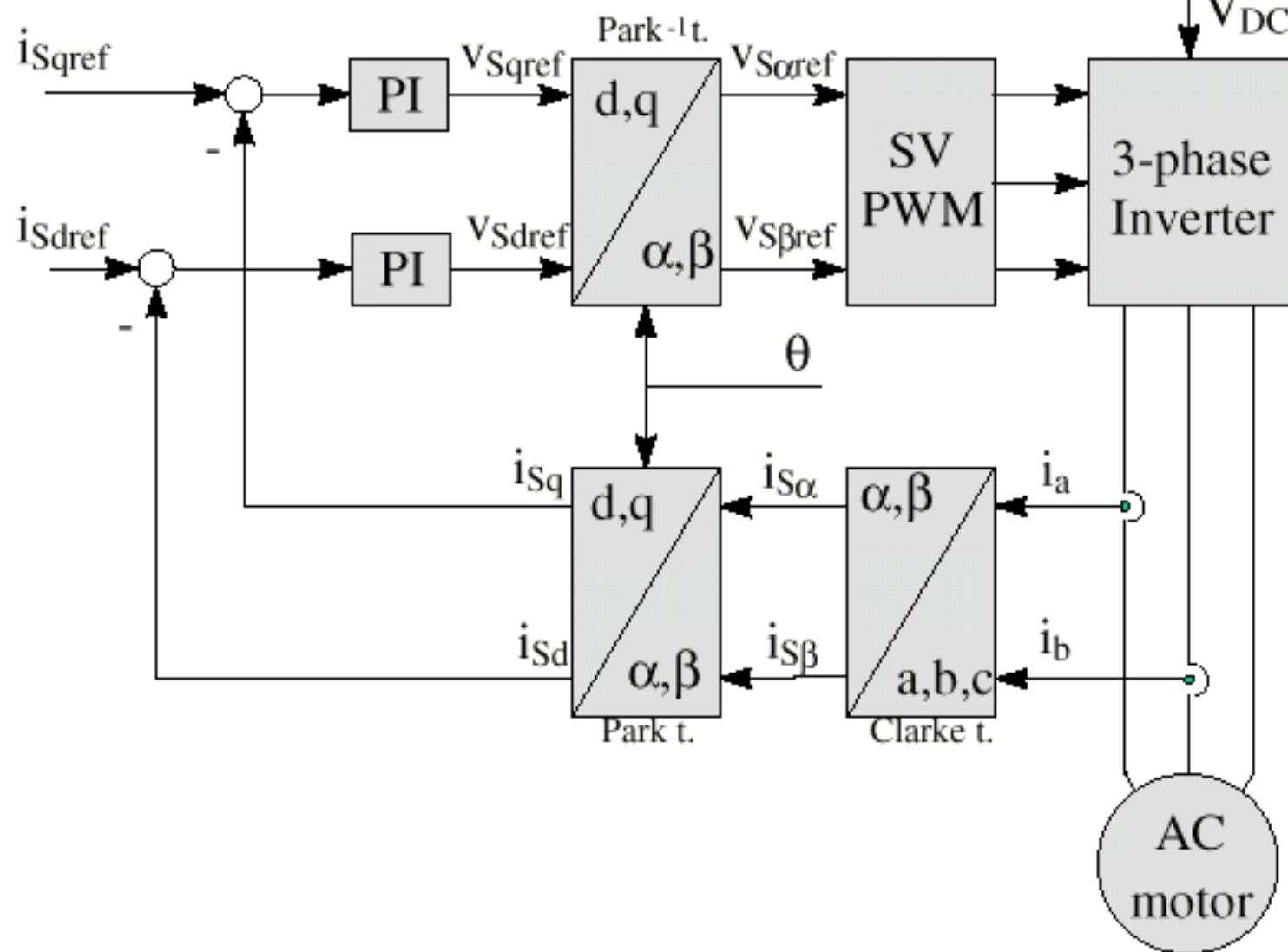
Transformación de Park

$$\begin{cases} i_{1d} = i_{1\alpha} \cos \rho + i_{1\beta} \sin \rho \\ i_{1q} = -i_{1\alpha} \sin \rho + i_{1\beta} \cos \rho \end{cases}$$

Transformación de Park inversa

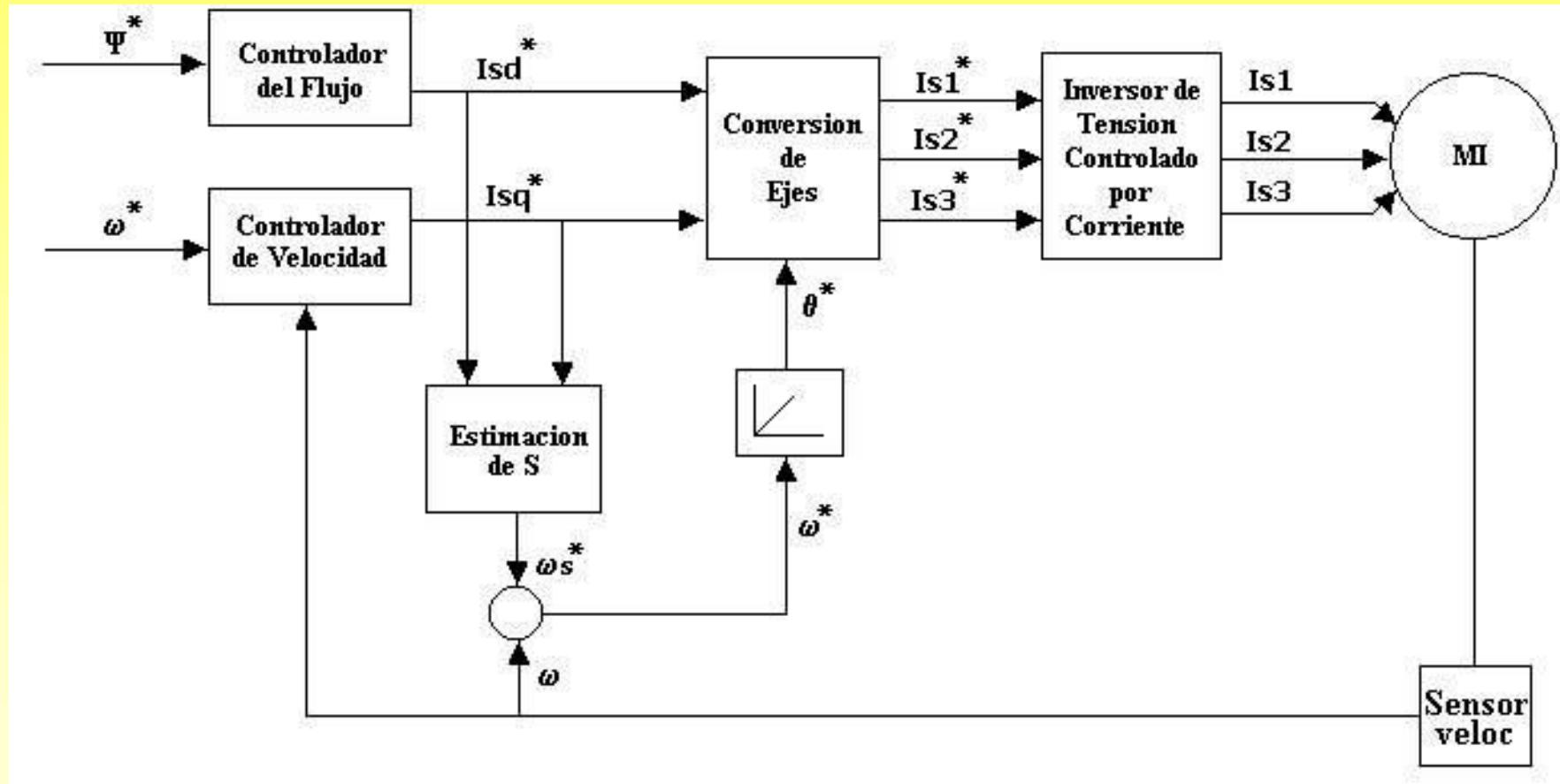
$$\begin{cases} v_{1\alpha} = v_{1d} \cos \rho - v_{1q} \sin \rho \\ v_{1\beta} = v_{1d} \sin \rho + v_{1q} \cos \rho \end{cases}$$

ESQUEMAS BÁSICOS DEL CONTROL VECTORIAL



CV directo con convertidor en fuente de tensión

ESQUEMAS BÁSICOS DEL CONTROL VECTORIAL



CV con convertidor en fuente de corriente

CONTROL VECTORIAL DE ACCIONAMIENTOS DE ALTERNA

Introducción

- Aplicaciones a velocidad variable
 - Motores de corriente continua
 - Fácil control
 - Mantenimiento caro
 - Motores de corriente alterna
 - Difícil control
 - Mantenimiento nulo

Introducción

- Motores de corriente continua
 - Aplicaciones a velocidad variable
 - Par proporcional a dos corrientes
- Motores de corriente alterna
 - Aplicaciones a velocidad constante

Introducción

- Objetivo del modelado dinámico

Expresar el par desarrollado como producto de dos corrientes desacopladas

Concepto de vector espacial

- Dado un sistema trifásico de tensiones

$$u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}$$

Se define el vector espacial de tensiones de estator como:

$$\vec{u}_s = u_{s1} + u_{s2}e^{j\gamma} + u_{s3}e^{2j\gamma}$$

Siendo

$$\gamma = 2\pi/3$$

Concepto de vector espacial

Desarrollando

$$e^{j\gamma} = \cos(\gamma) + j\sin(\gamma) = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$e^{2j\gamma} = \cos(2\gamma) + j\sin(2\gamma) = -0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Concepto de vector espacial

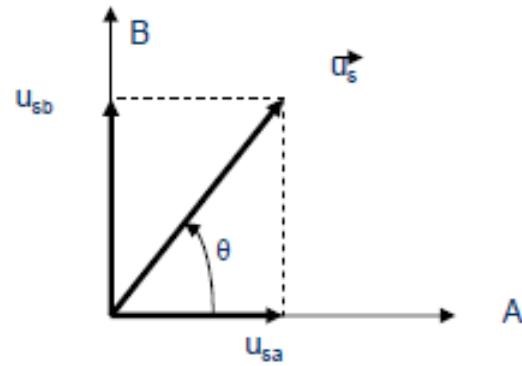
$$\bar{u}_s = (u_{s1} - 0.5u_{s2} - 0.5u_{s3}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{s2} - u_{s3})$$

$$u_{s1} + u_{s2} + u_{s3} = 0$$

$$\boxed{\bar{u}_s = \frac{3}{2}u_{s1} + j \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{s2} - u_{s3})}$$

Transformación de coordenadas

- Transformación en un sistema A-B fijo al estator



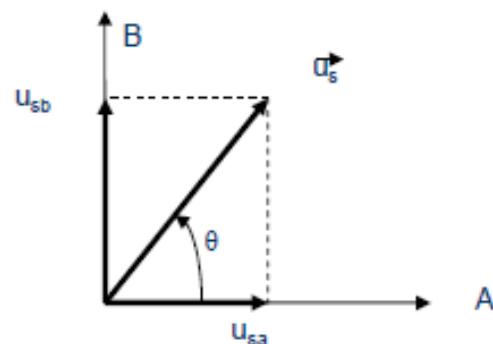
Transformación de coordenadas

Proyectando sobre los ejes A-B

$$\vec{u}_s = u_{sa} + ju_{sb} = |\vec{u}_s| e^{j\theta}$$

$$u_{sa} = \frac{3}{2} u_{s1}$$

$$u_{sb} = \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{s2} - u_{s3})$$



Transformación de coordenadas

Transformación inversa

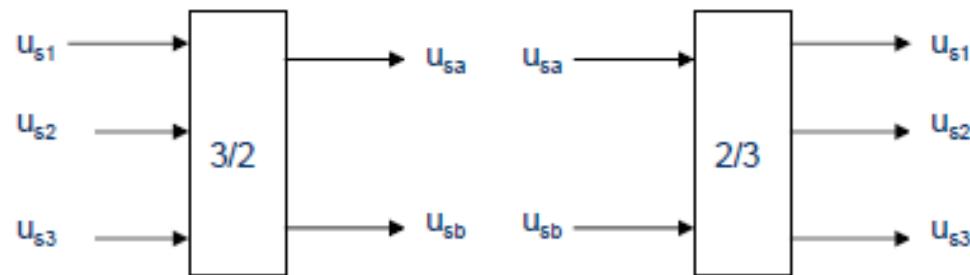
$$u_{s1} = \frac{2}{3}u_{sa}$$

$$u_{s2} = -\frac{1}{3}u_{sa} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{sb}$$

$$u_{s2} = -\frac{1}{3}u_{sa} - \frac{1}{\sqrt{3}}u_{sb}$$

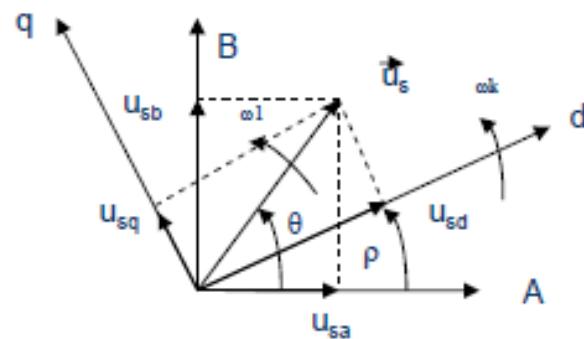
Transformación de coordenadas

Representación en diagrama de bloques



Transformación de coordenadas

- Transformación en un sistema d-q
Sistemas de referencia

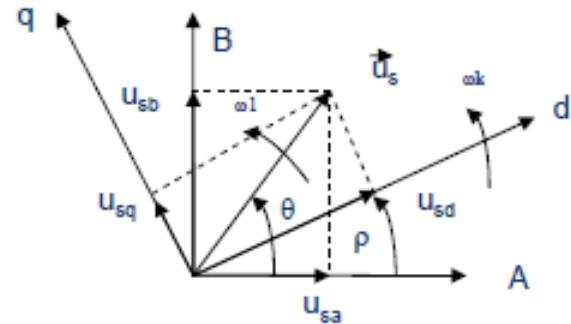


Transformación de coordenadas

$$\vec{u}_s = u_{sa} + j u_{sb} = |\vec{u}_s| e^{j\theta}$$

$$\vec{u}_{sk} = u_{sd} + j u_{sq} = |\vec{u}_s| e^{j(\theta-\rho)}$$

$$\vec{u}_{sk} = |\vec{u}_s| e^{j\theta} e^{-j\rho} = \vec{u}_s e^{-j\rho}$$



Transformación de coordenadas

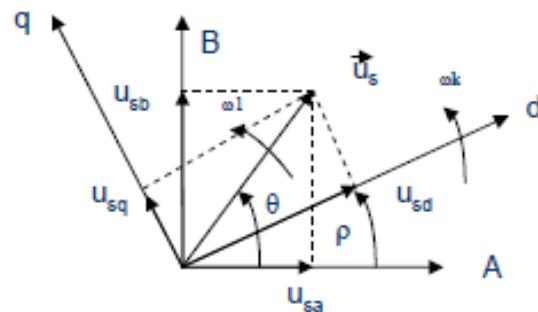
Proyecciones:

$$u_{sa} = |\vec{u}_s| \cos(\theta)$$

$$u_{sb} = |\vec{u}_s| \sin(\theta)$$

$$u_{sd} = |\vec{u}_s| \cos(\theta - \rho)$$

$$u_{sq} = |\vec{u}_s| \sin(\theta - \rho)$$



Transformación de coordenadas

Desarrollando las 2 últimas expresiones:

$$u_{sd} = |\vec{u}_s| \cos(\theta) \cos(\rho) + |\vec{u}_s| \sin(\theta) \sin(\rho)$$

$$u_{sq} = |\vec{u}_s| \sin(\theta) \cos(\rho) - |\vec{u}_s| \cos(\theta) \sin(\rho)$$

$$u_{sd} = u_{sa} \cos(\rho) + u_{sb} \sin(\rho)$$

$$u_{sq} = -u_{sa} \sin(\rho) + u_{sb} \cos(\rho)$$

Transformación de coordenadas

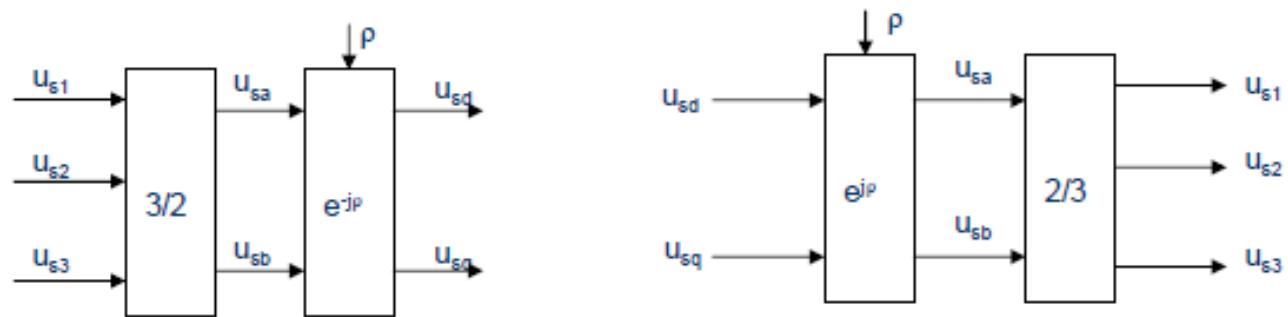
En forma matricial:

$$\begin{vmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\rho) & \operatorname{sen}(\rho) \\ -\operatorname{sen}(\rho) & \cos(\rho) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\rho) & -\operatorname{sen}(\rho) \\ \operatorname{sen}(\rho) & \cos(\rho) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{vmatrix}$$

Transformación de coordenadas

Diagrama de bloques

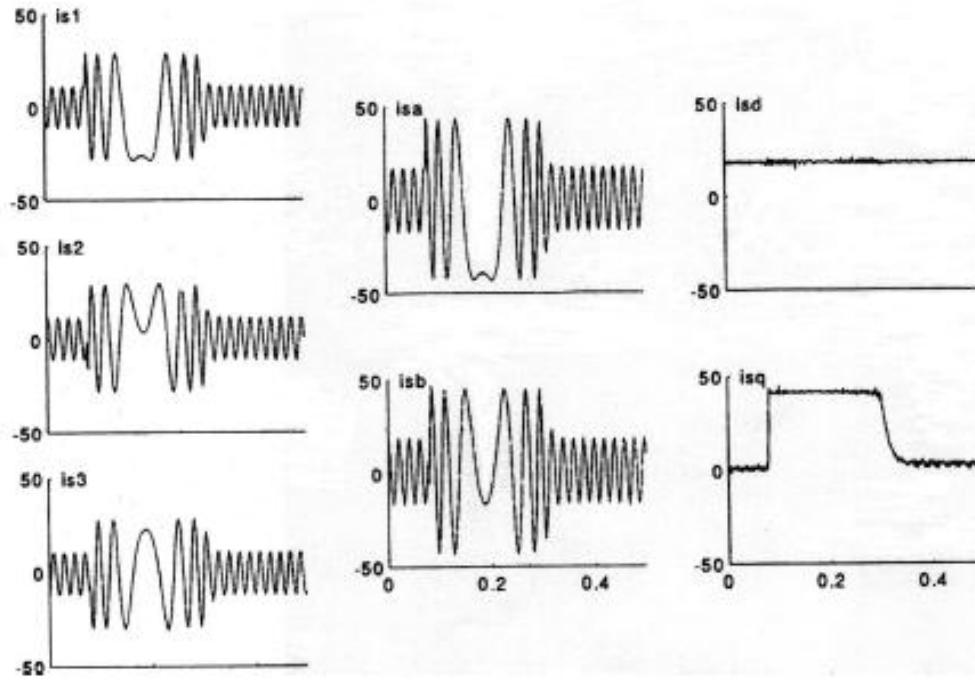


Características de las transformaciones

En régimen permanente:

- U_{s1}, U_{s2}, U_{s3} son senoidales
- U_{sa}, U_{sb} son senoidales
- U_{sd}, U_{sq} son constantes

Características de las transformaciones



Modelo dinámico en coordenadas d-q

Objetivo=Control desacoplado del par y flujo

- Control en coordenadas de flujo de estator
- Control en coordenadas de flujo de rotor
(Campo orientado)
- Control en coordenadas de flujo en entrehierro

Modelo dinámico en coordenadas d-q

Modelo dinámico de Park

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s Di_{sd} + L_m Di_{rd} - L_s \omega_k i_{sq} - L_m \omega_k i_{rq}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s Di_{sq} + L_m Di_{rq} + L_s \omega_k i_{sd} + L_m \omega_k i_{rd}$$

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + L_m Di_{sd} + L_r Di_{rd} - L_m (\omega_k - \omega) i_{sq} - L_r (\omega_k - \omega) i_{rq}$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + L_m Di_{sq} + L_r Di_{rq} + L_m (\omega_k - \omega) i_{sd} + L_r (\omega_k - \omega) i_{rd}$$

Modelo dinámico en coordenadas d-q

Modelo dinámico de Park

d/dt=D

$$\begin{vmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_s + L_s D & -L_s \omega_k & L_m D & -L_m \omega_k \\ L_s \omega_k & R_s + L_s D & L_m \omega_k & L_m D \\ L_m D & -L_m (\omega_k - \omega) & R_r + L_r D & -L_r (\omega_k - \omega) \\ L_m (\omega_k - \omega) & L_m D & L_r (\omega_k - \omega) & R_r + L_r D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{vmatrix}$$

Modelo dinámico en coordenadas d-q

- Los ejes d-q giran en sincronismo con el vector espacial de tensiones de estator
- Dependen de tensiones y corrientes de rotor
- Magnitudes de rotor no medibles
- No se puede utilizar en control

Modelo dinámico en campo orientado

- Eliminar del modelo de Park las corrientes de rotor
- Eje d apunte en la dirección del flujo máximo en el rotor y el eje q ortogonal a el.
- El vector espacial de flujo en el rotor solo tendrá componente real sobre el eje d
- Ejes d-q giran a ω_{mR} frecuencia de giro del campo magnético en el rotor

Modelo dinámico en campo orientado

- Ecuación del par desarrollado

$$m_e = \frac{2}{3} p L_m \operatorname{Im}[\bar{i}_{sk} \bar{i}_{rk}^*]$$

$$k = \frac{2}{3} \frac{L_m}{1 + \sigma_r}$$

$$m_e = p \cdot k \cdot i_{mR} \cdot i_{sq}$$

Modelo dinámico en campo orientado

- Ecuaciones de corrientes y tensiones

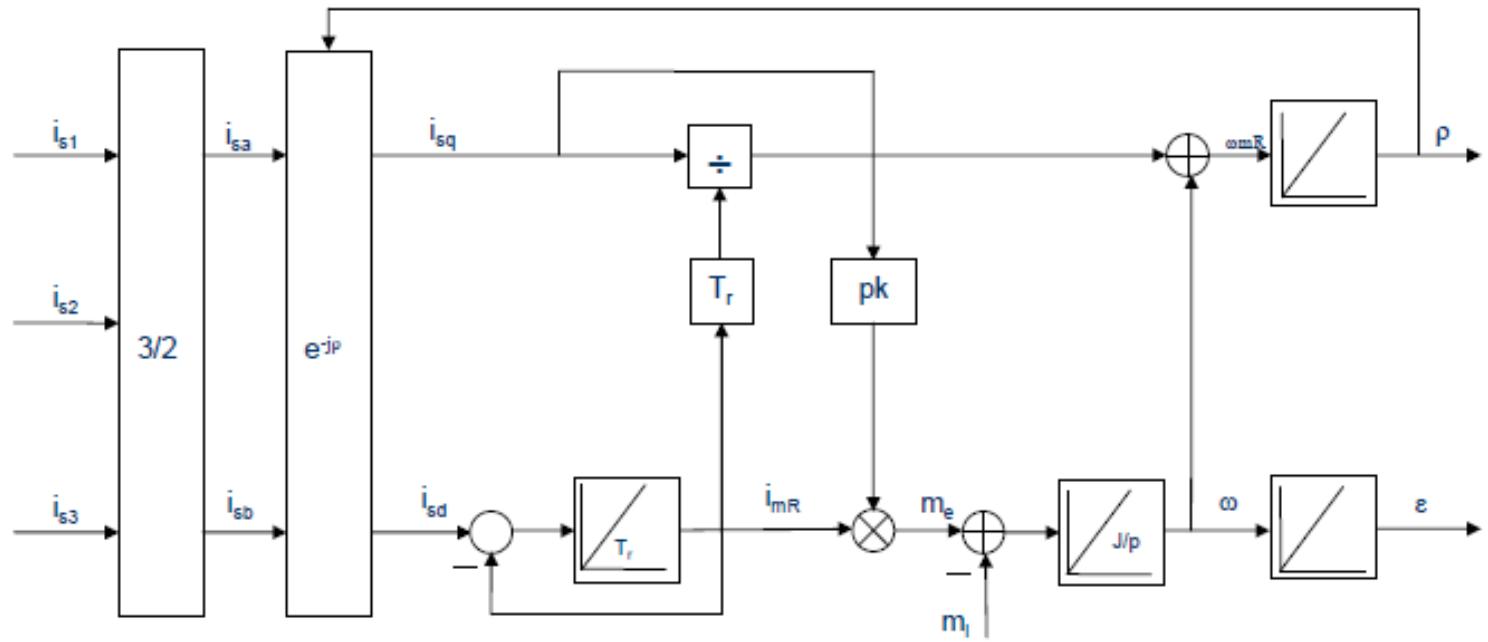
$$\sigma T_s \frac{di_{sd}}{dt} + i_{sd} = \frac{u_{sd}}{R_s} + T_s \sigma \omega_{mR} i_{sq} - (1 - \sigma) T_s \frac{di_{mR}}{dt}$$

$$\sigma T_s \frac{di_{sq}}{dt} + i_{sq} = \frac{u_{sq}}{R_s} - T_s \sigma \omega_{mR} i_{sd} - T_s (1 - \sigma) \omega_{mR} i_{mR}$$

$$i_{sd} = i_{mR} + T_r \frac{di_{mR}}{dt}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega_{mR} = \omega + \frac{i_{sq}}{T_r i_{mR}}$$

Modelo dinámico en campo orientado



Control vectorial del motor asíncrono

Ecuaciones de control

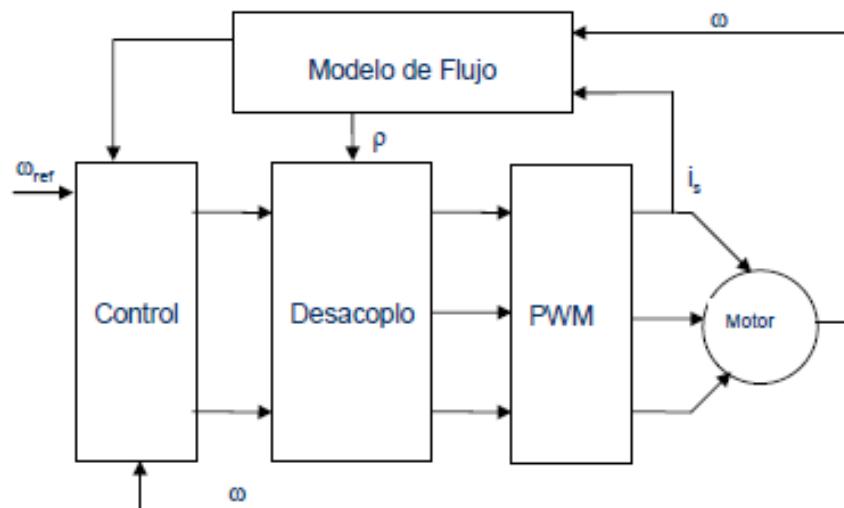
$$m_e = p \cdot k \cdot i_{mR} \cdot i_{sq}$$

$$\psi_{rd} = L_m i_{mR}$$

$$i_{sd} = i_{mR} + T_r \frac{di_{mR}}{dt}$$

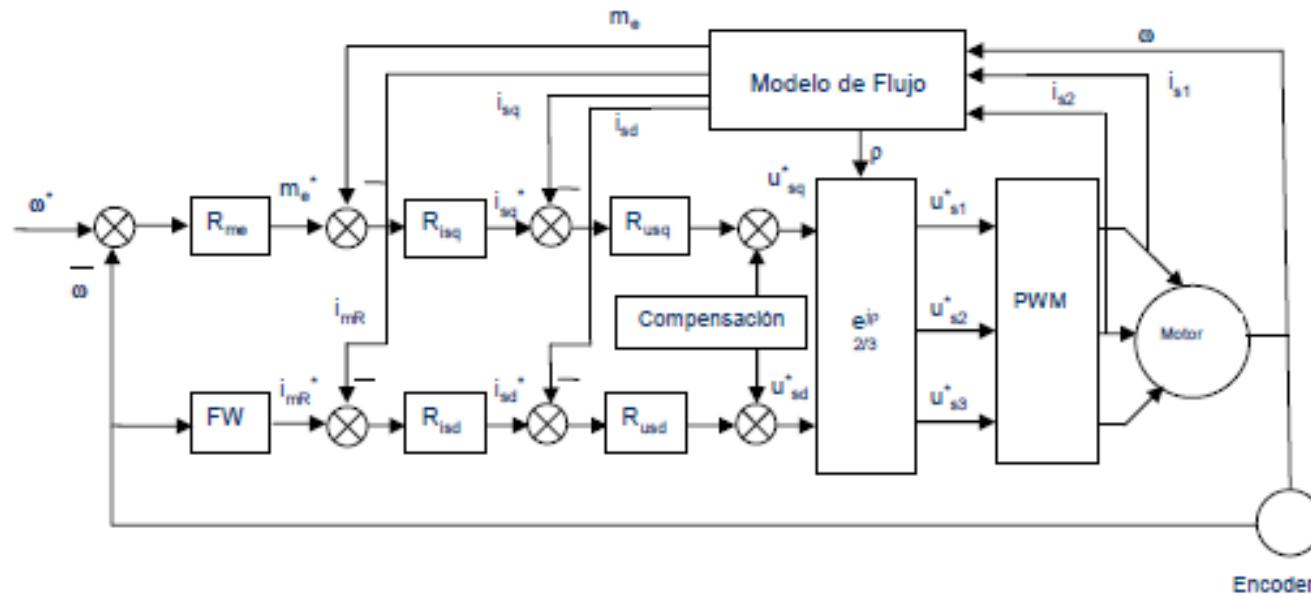
$$m_e - m_l = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt}$$

Control vectorial del motor asíncrono



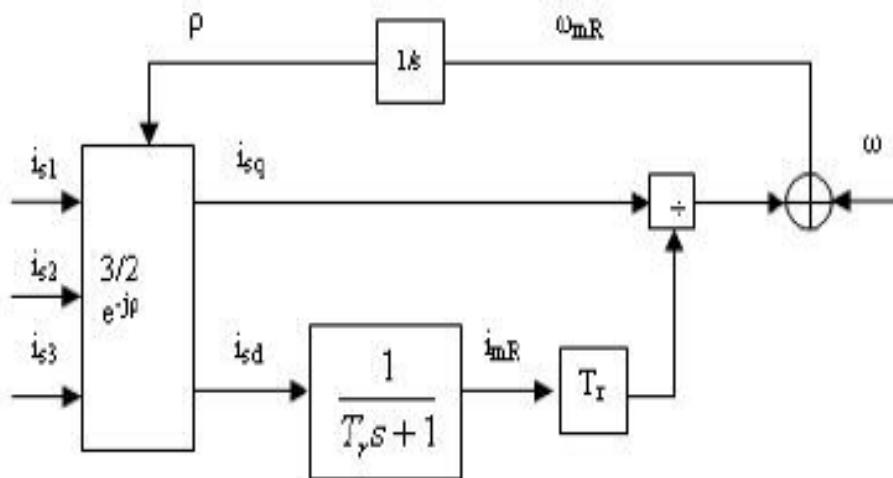
Control vectorial del motor asíncrono

- Control alimentando en tensión



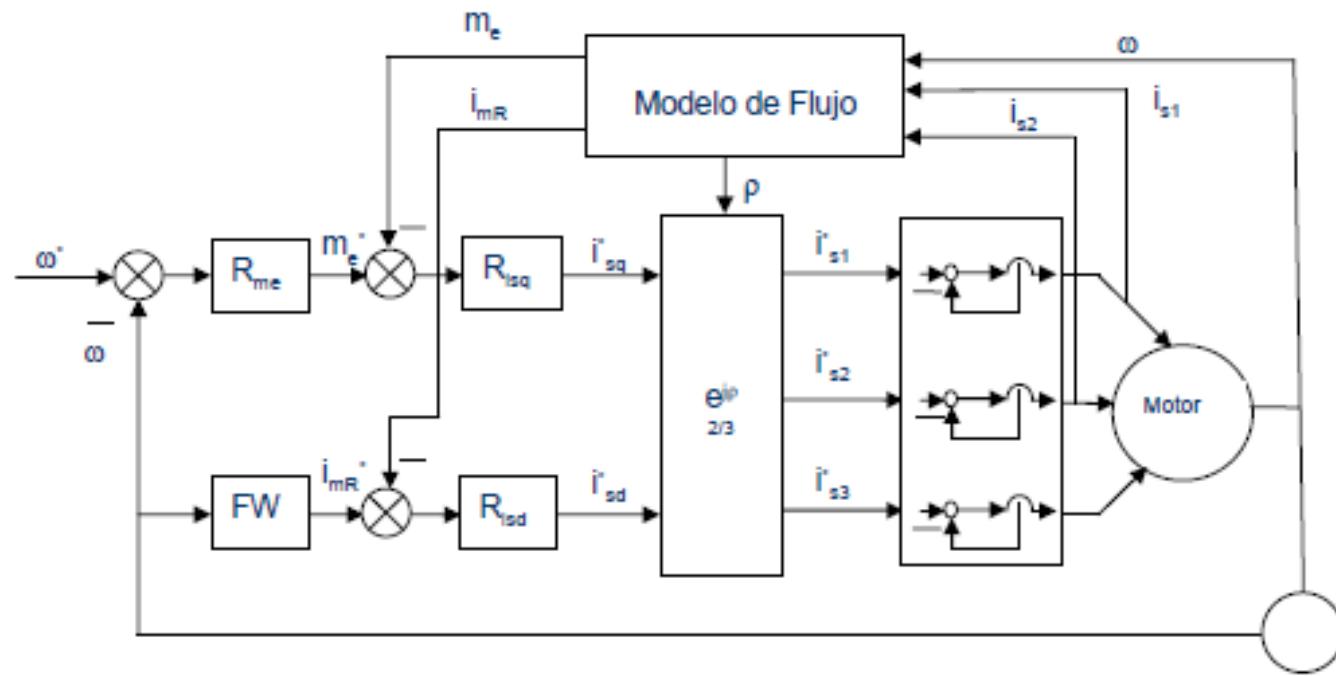
Control vectorial del motor asíncrono

Modelo de flujo



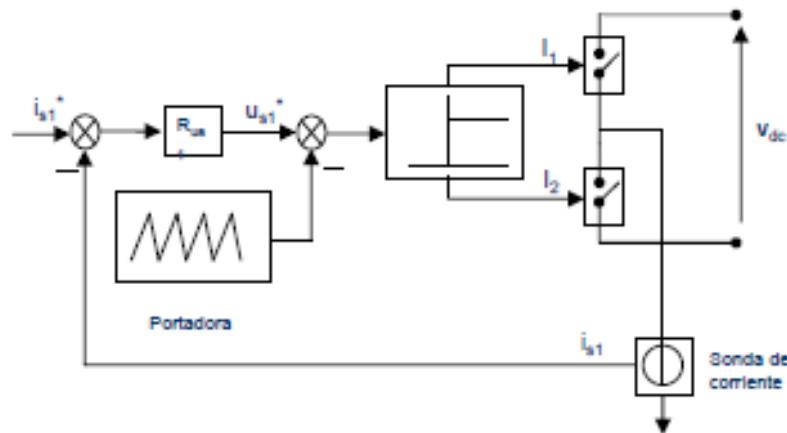
Control vectorial del motor asíncrono

Control alimentando en corriente



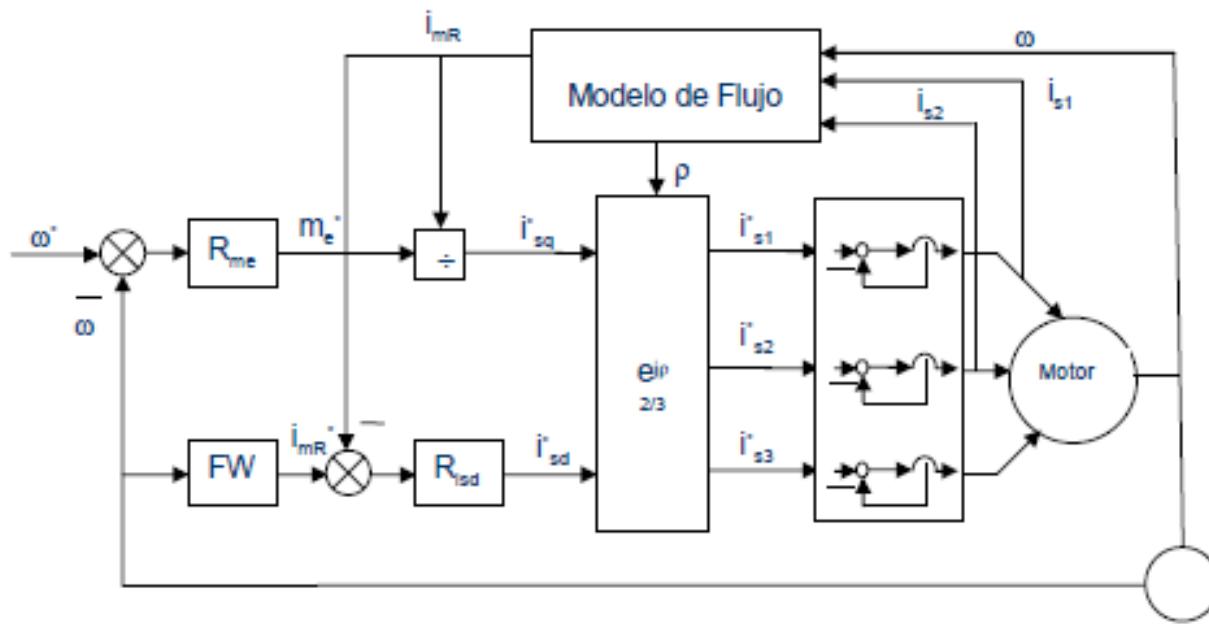
Control vectorial del motor asíncrono

- Lazo interno de corriente



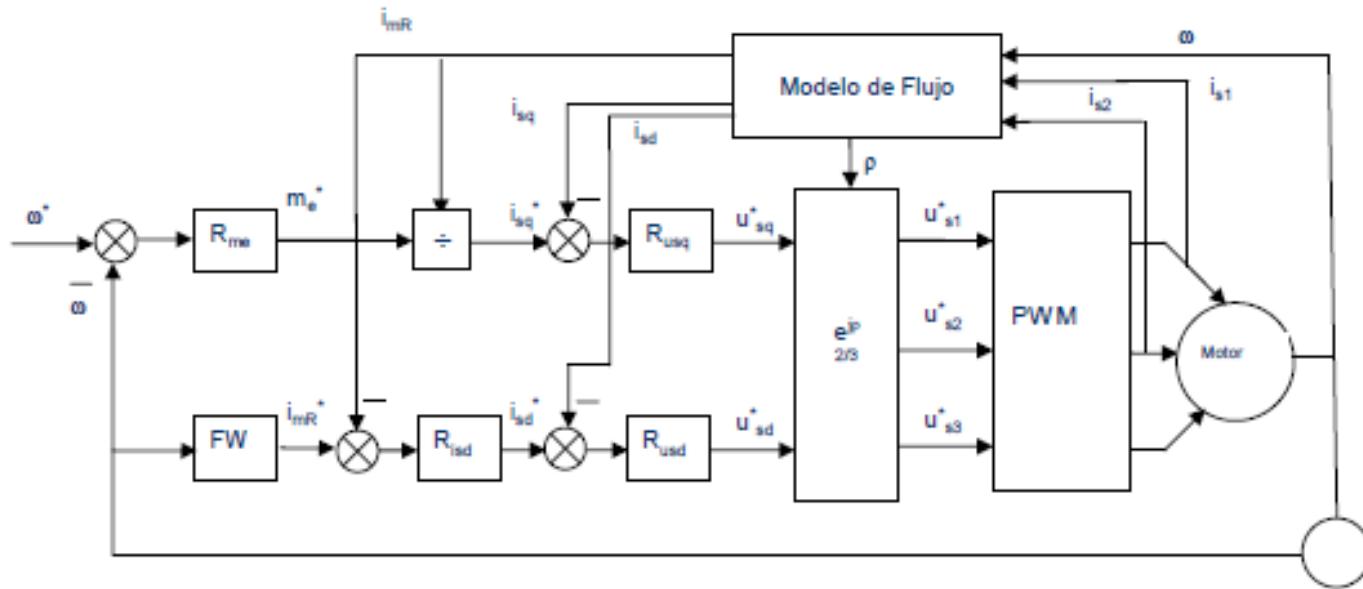
Control vectorial del motor asíncrono

Regulador estacionario



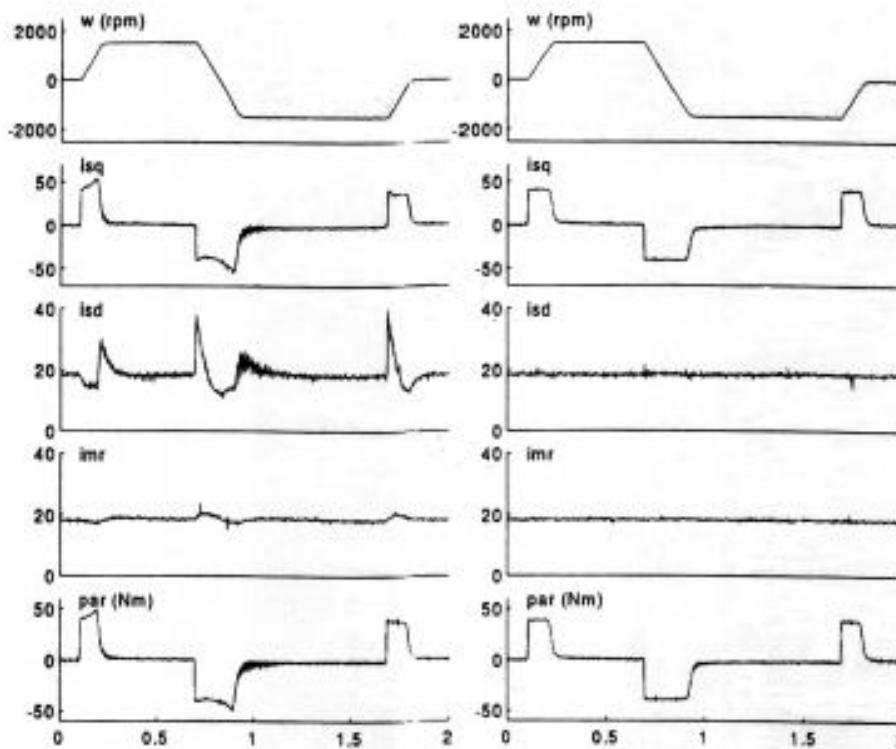
Control vectorial del motor asíncrono

Control con regulador síncrono

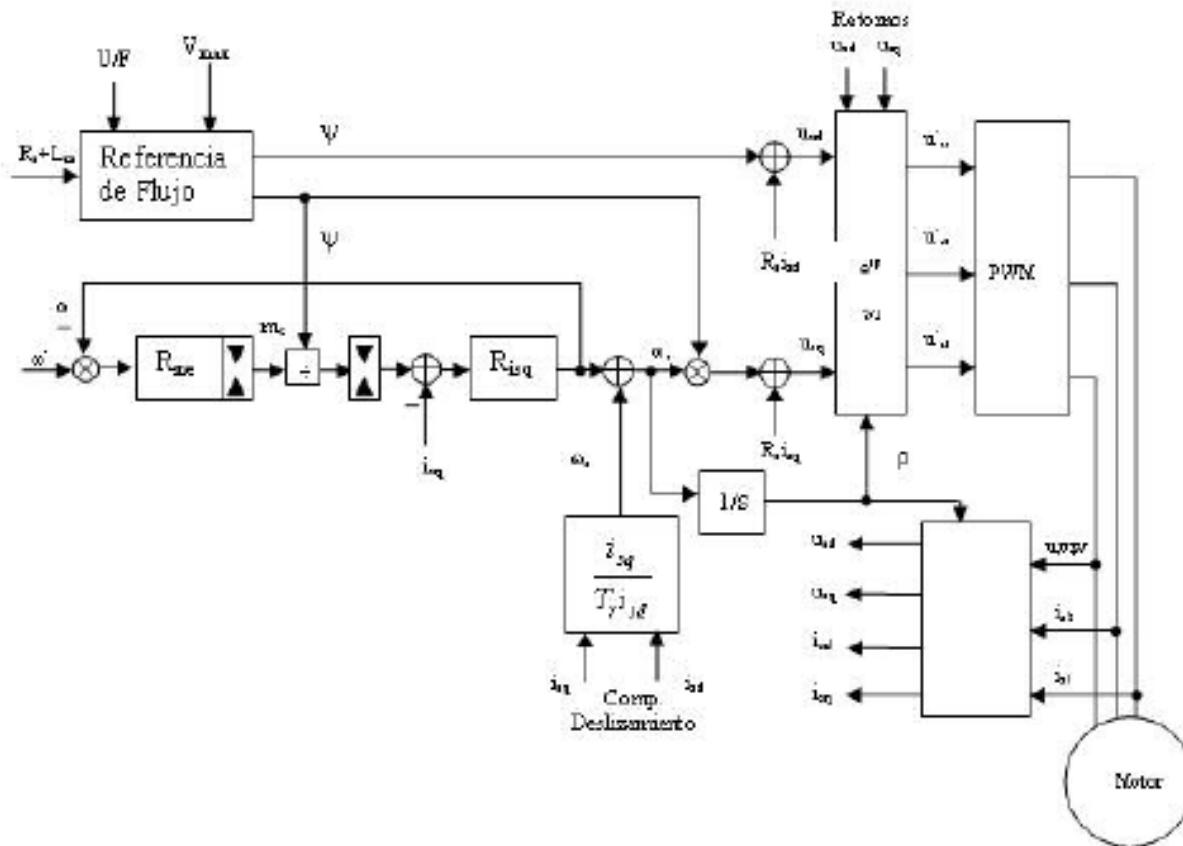


Control vectorial del motor asíncrono

Regulador estacionario-Regulador síncrono



Control vectorial del motor asíncrono



Control vectorial del motor asíncrono

