



UNIVERSIDADE
DE VIGO

MOTORES ASÍNCRONOS

Regulación de velocidad

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

Variación de velocidad. Introducción

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

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

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

CUANTITATIVO

Por el número y la potencia unitaria de los equipos

CUALITATIVO

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

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

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

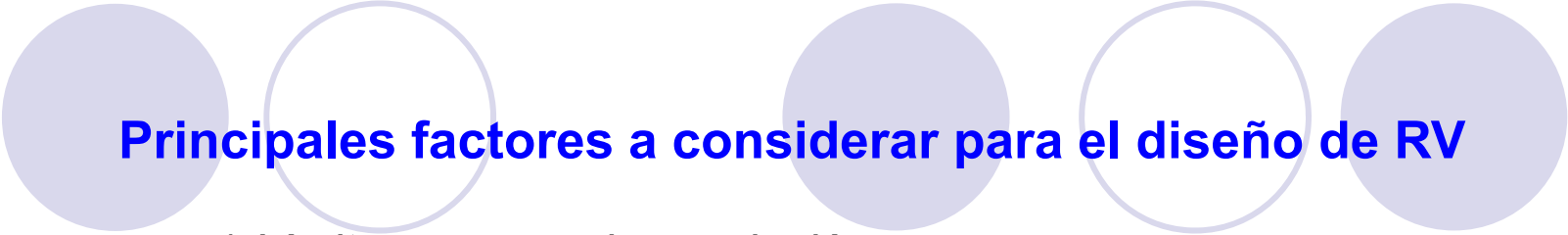


Variación de velocidad. Introducción

Motores que requieren regulación de velocidad:

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

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



Principales factores a considerar para el diseño de RV

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

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



Variación de velocidad. Introducción

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



Variación de velocidad. Introducción

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

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

Donde **T_m** es el par motor, **T_r** el par resistente, **J** es el momento de inercia del conjunto motor-maquina accionada y **ω** es la velocidad angular de dicho conjunto.

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



Variación de velocidad. Introducción

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

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

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

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

Características de la fuerza motriz de origen eléctrico

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

Características de la fuerza motriz de origen eléctrico

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

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

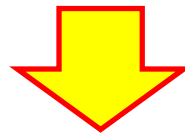
Motores asíncronos. Regulación de velocidad

INTRODUCCIÓN. Regulación de motores en la EU

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

El uso de motores eficientes acompañados de un regulador electrónico supondría un ahorro en la Unión Europea de 135 billones de kWh. Las emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica se reducirían en 69 millones de toneladas anuales.

CON TODO ELLO:



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

Motores asíncronos. Regulación de velocidad

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

Velocidad de sincronismo n_1 (n_s)

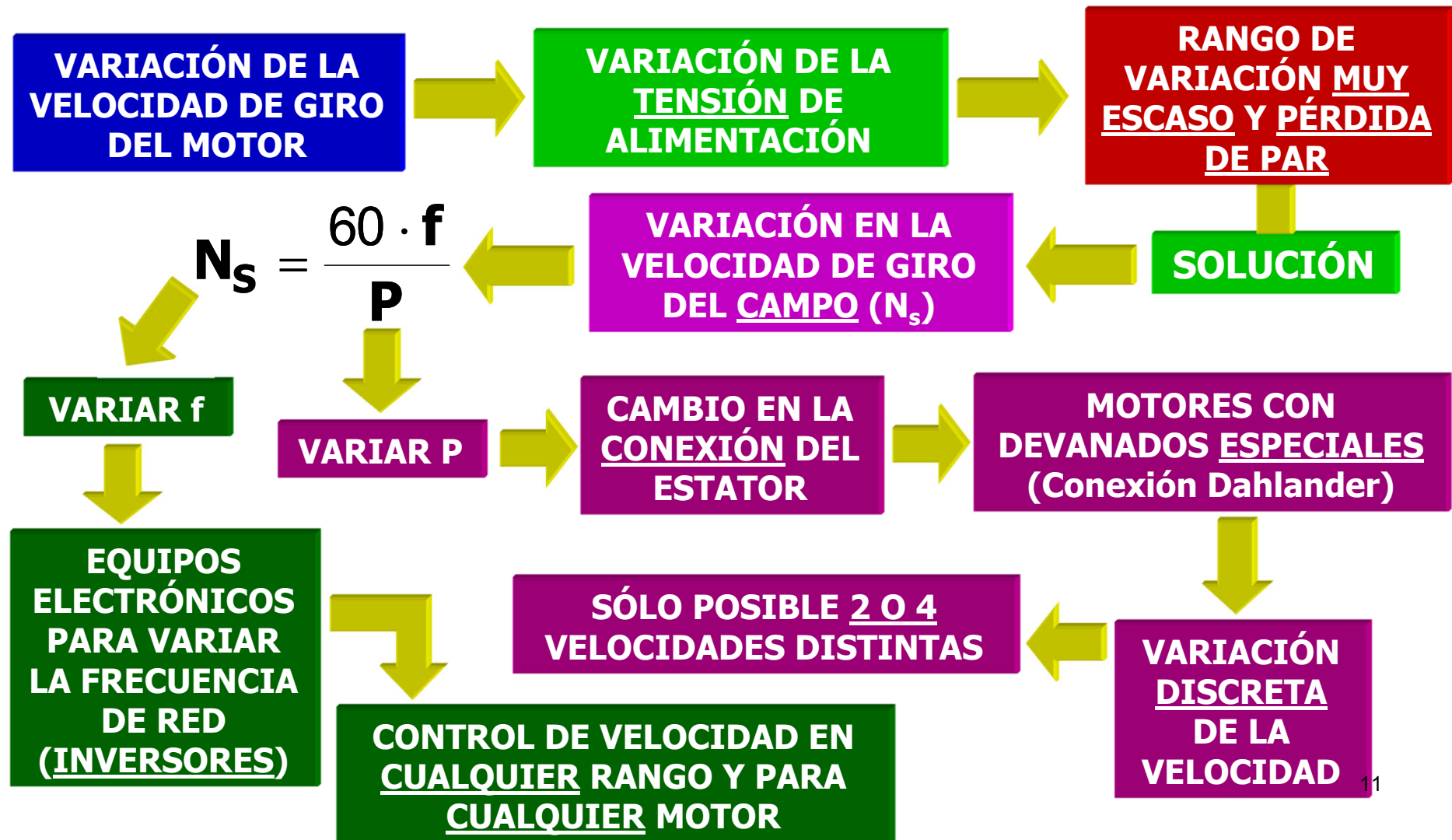
- Número de pares de polos de la máquina
- Frecuencia de alimentación.

Deslizamiento

- Variando la tensión aplicada al motor.
- Variando la resistencia del circuito rotórico
- Inyectando en el circuito rotórico una tensión de igual frecuencia que la f.e.m. inducida en él y de magnitud y fase variables.

Para modificar el deslizamiento hay que actuar sobre la forma de la característica par-deslizamiento del motor para obtener con la misma carga distintas velocidades

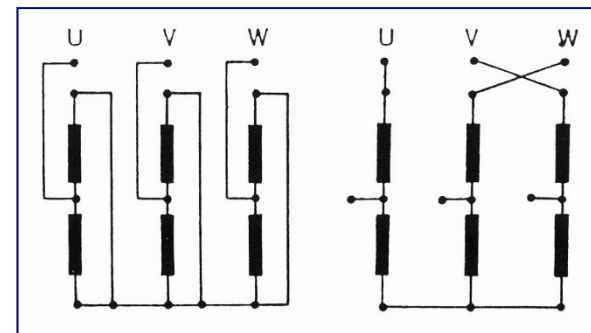
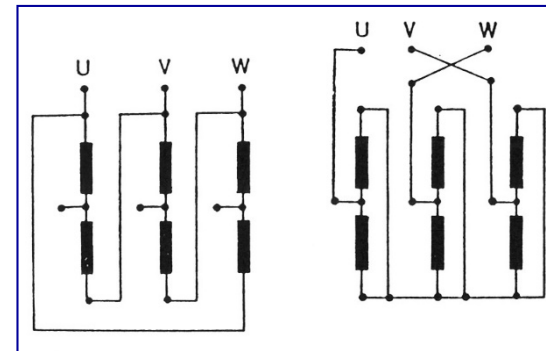
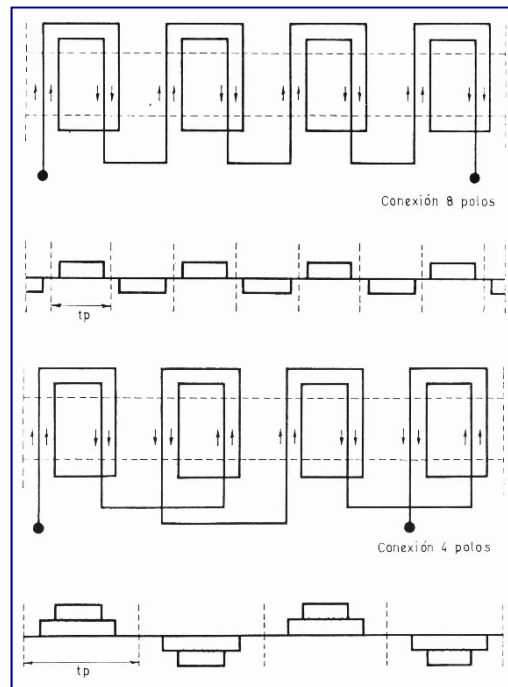
Introducción a la variación de velocidad de los motores de C.A.



Motores asíncronos. Regulación de velocidad

Velocidad de
sincronismo n_1

Regulación por cambio del número de polos



VARIAR P



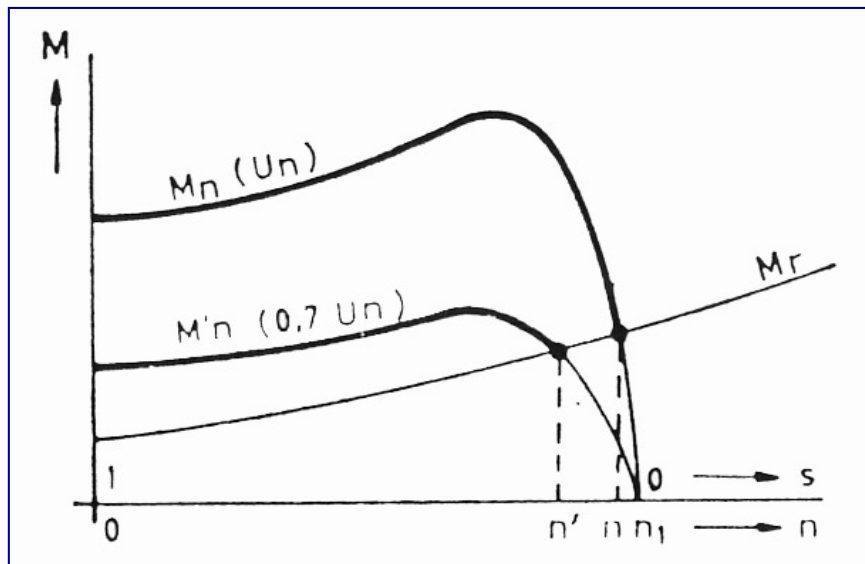
**CAMBIO EN LA
CONEXIÓN DEL
ESTATOR**



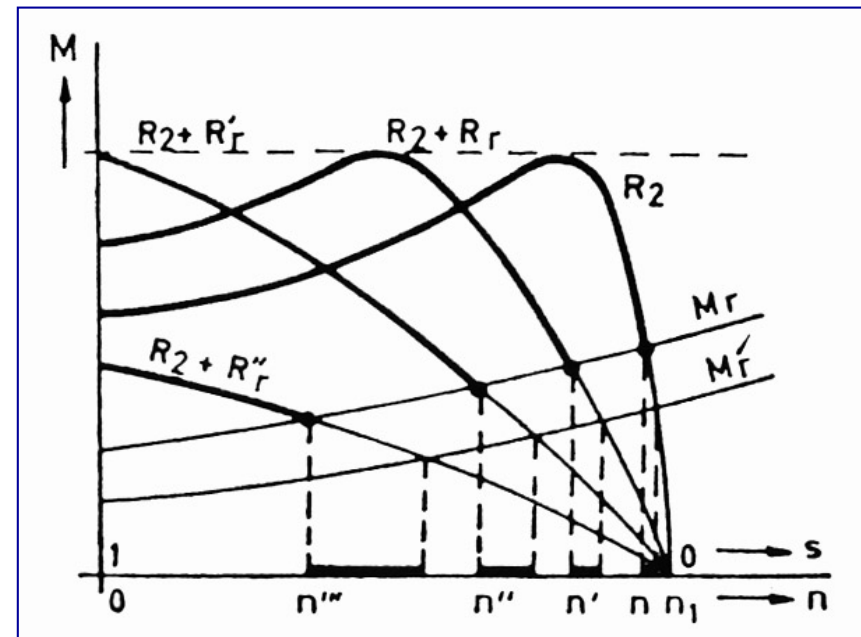
**MOTORES CON
DEVANADOS ESPECIALES
(Conexión Dahlander)**

Motores asíncronos. Regulación de velocidad

Regulación de velocidad actuando sobre el deslizamiento



Variando la tensión aplicada al estator

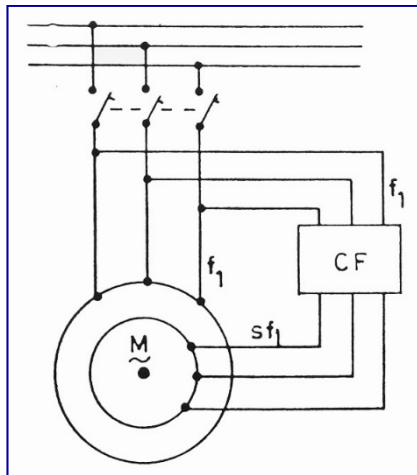


Variando la resistencia del circuito rotórico

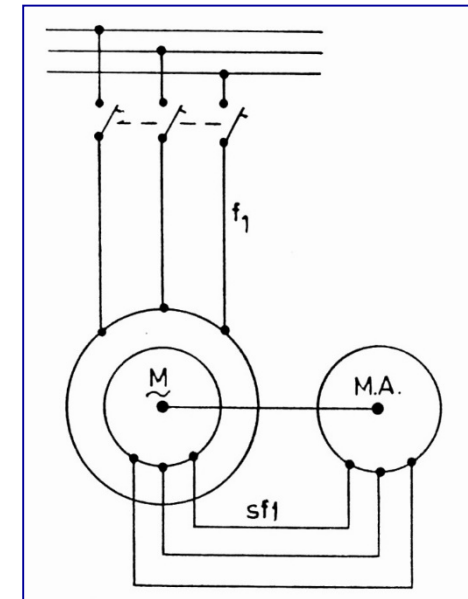
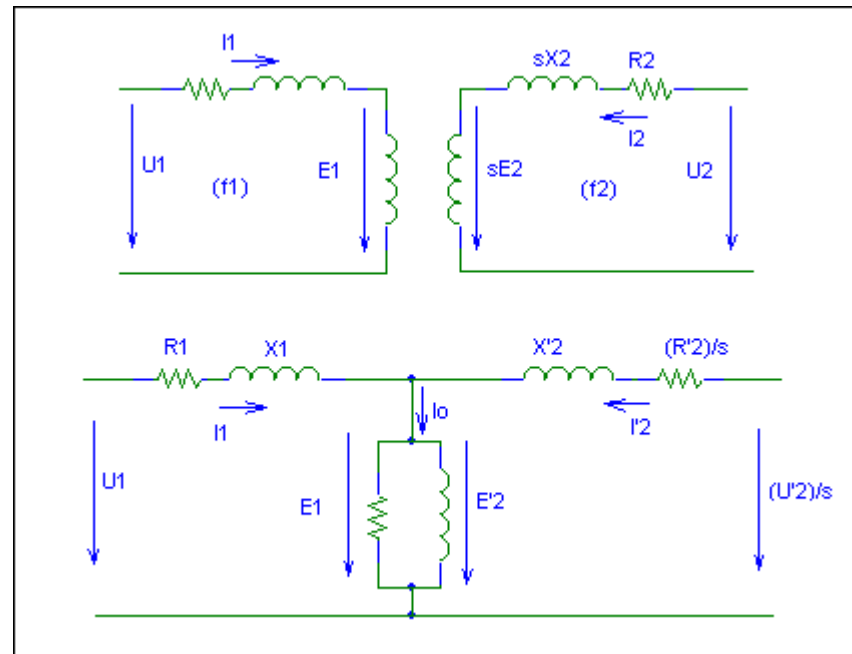
Motores asíncronos. Regulación de velocidad

Actuando sobre el deslizamiento

Por inyección de una f.e.m. en el rotor



Mediante un convertidor de frecuencia y tensión



Mediante una máquina auxiliar.

$$I_1 = I_0 + (-I'_2)$$

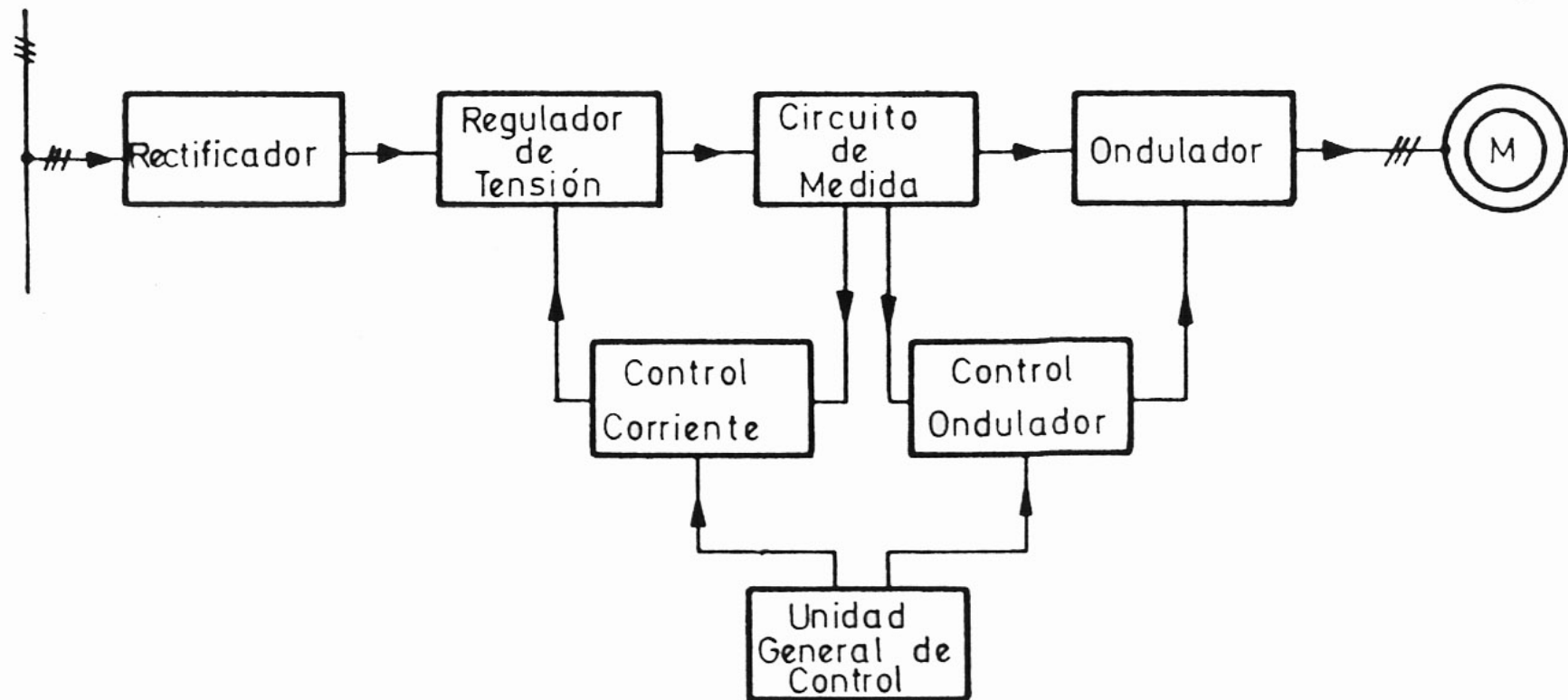
$$U_1 = E_1 + I_1 \cdot (R_1 + jX_1)$$

$$s \cdot E'_2 = U'_2 + I_2 \cdot (R'_2 + j \cdot sX'_2)$$

$$E'_2 = \frac{U'_2}{s} + I'_2 \cdot \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)$$

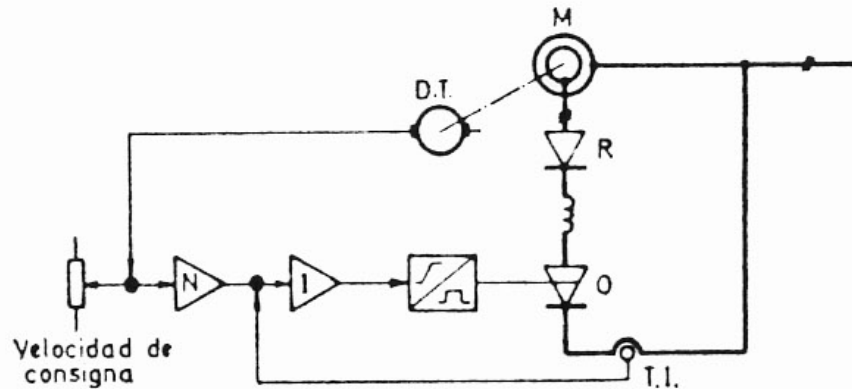
Motores asíncronos. Regulación de velocidad

Equipos rectificadores-onduladores entre el estator y la red.

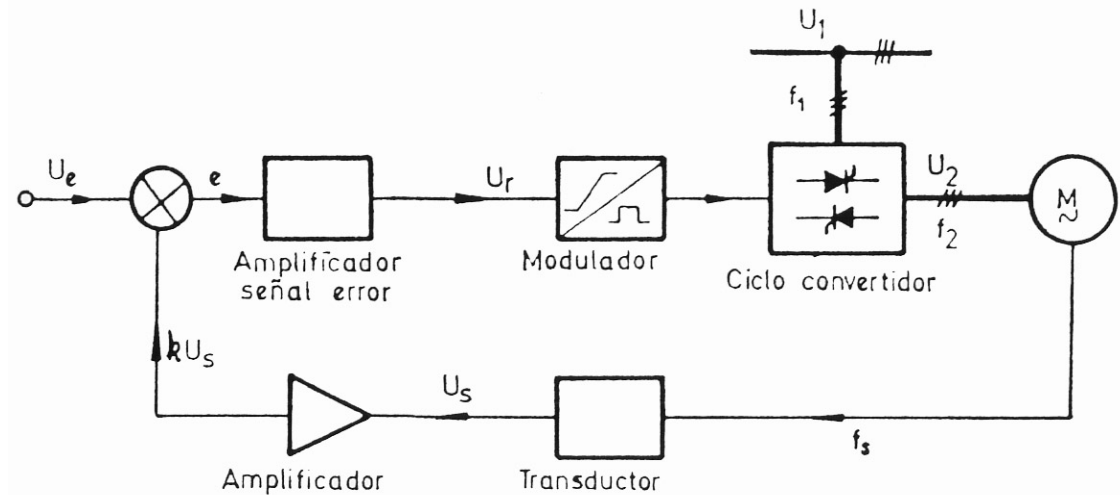
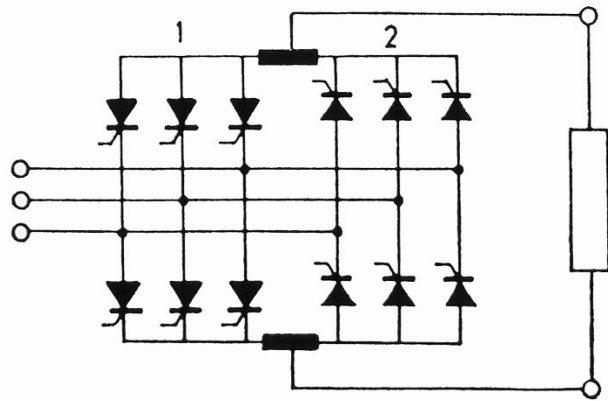
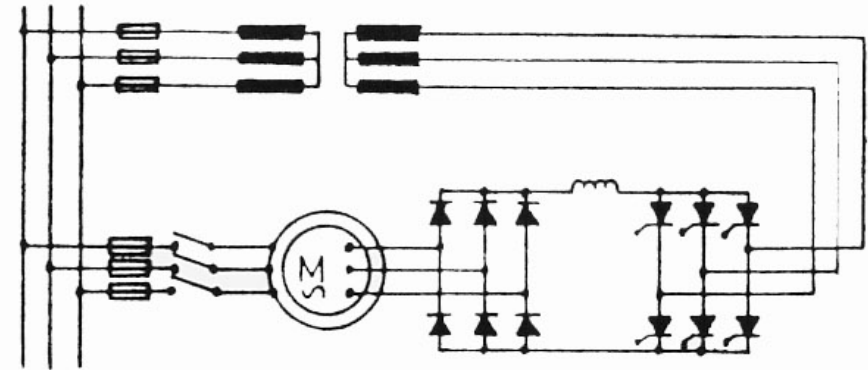


Motores asíncronos. Regulación de velocidad

Equipos rectificadores-onduladores entre el rotor y la red



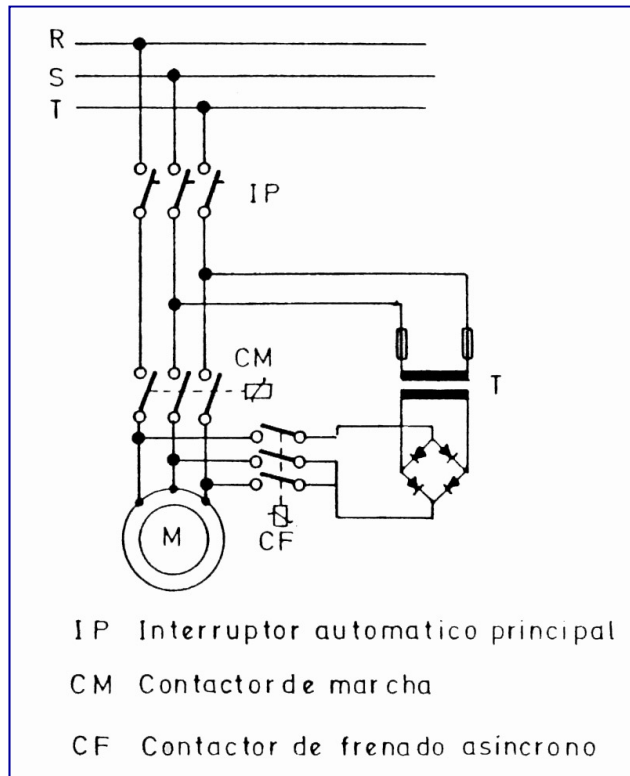
Cascada hiposíncrona



Ciclo-convertidor

Motores asíncronos. Frenado

Frenado dinámico



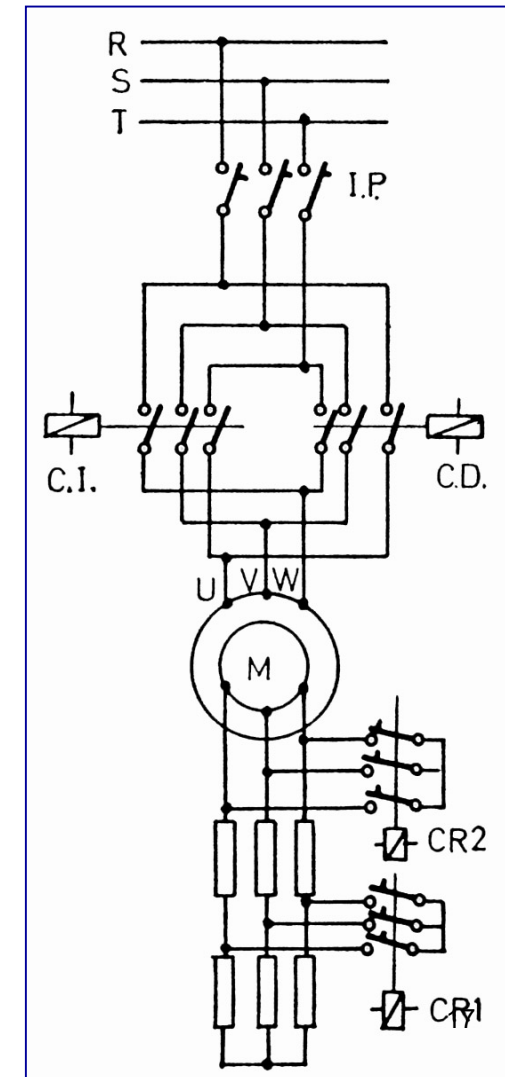
Frenado regenerativo

Se utiliza en equipos montacargas y grúas para limitar la velocidad en los descensos de cargas pesadas haciendo trabajar el motor como generador

Contramarcha.- Es un tipo de frenado que se utiliza en caso de emergencia

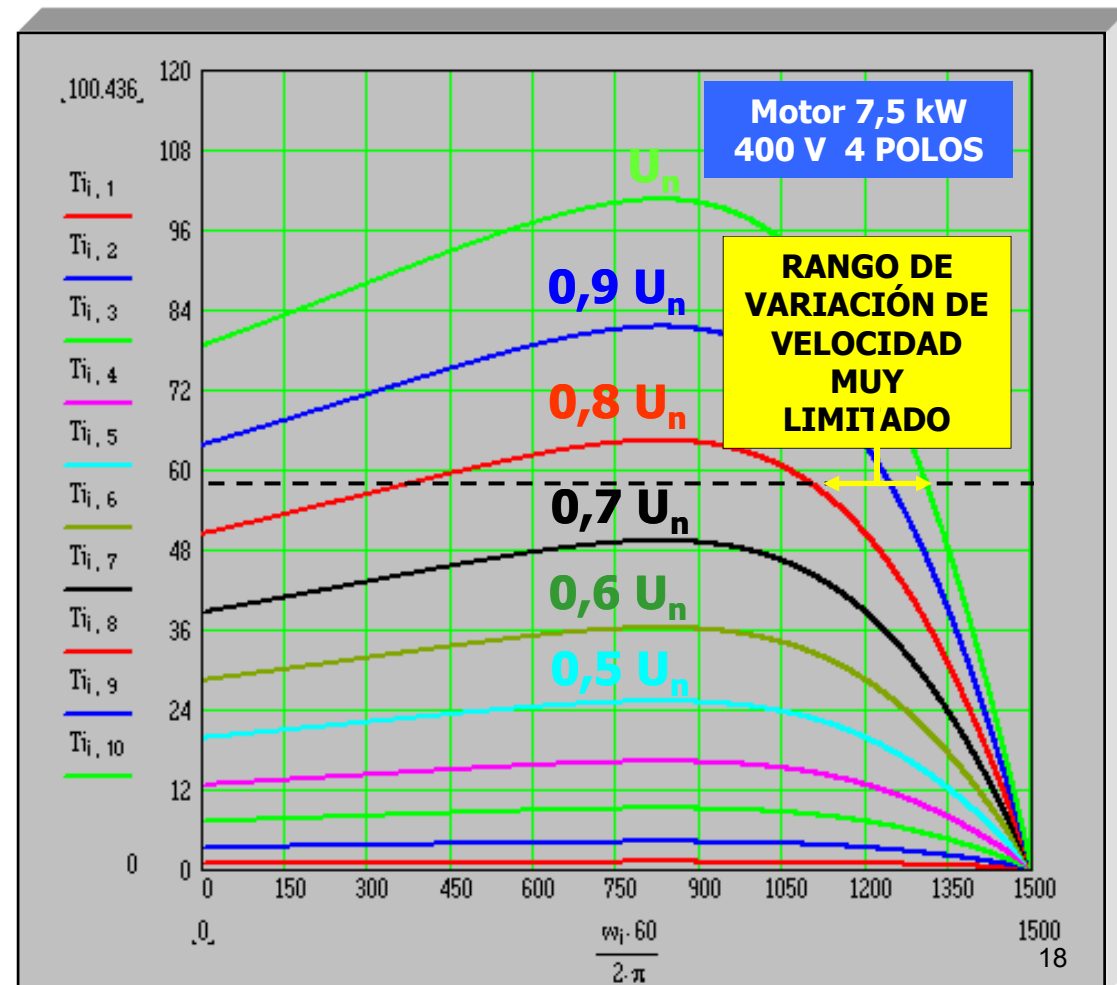
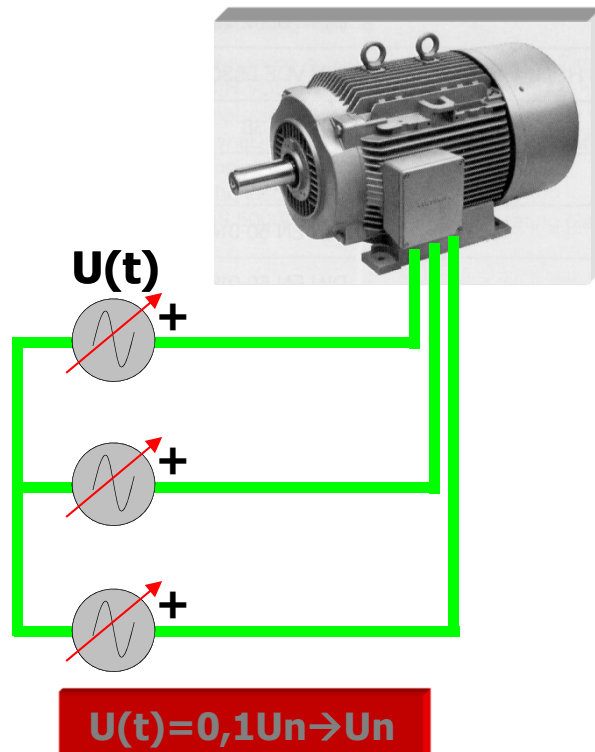
En los motores de rotor bobinado puede limitarse la corriente de frenado sin perder par de frenado insertando parte o todo el reostato de arranque

Contramarcha



Variación del par de un motor asíncrono con la tensión de alimentación

MOTOR ALIMENTADO CON FUENTE DE TENSIÓN: VARIACIÓN DEL PAR CON LA TENSIÓN



El motor asíncrono alimentado en corriente I

EXISTEN EQUIPOS INDUSTRIALES QUE ALIMENTAN EL MOTOR ASÍNCRONO EN CORRIENTE: FUENTE DE ALIMENTACIÓN EQUIVALENTE A FUENTE DE CORRIENTE TRIFÁSICA



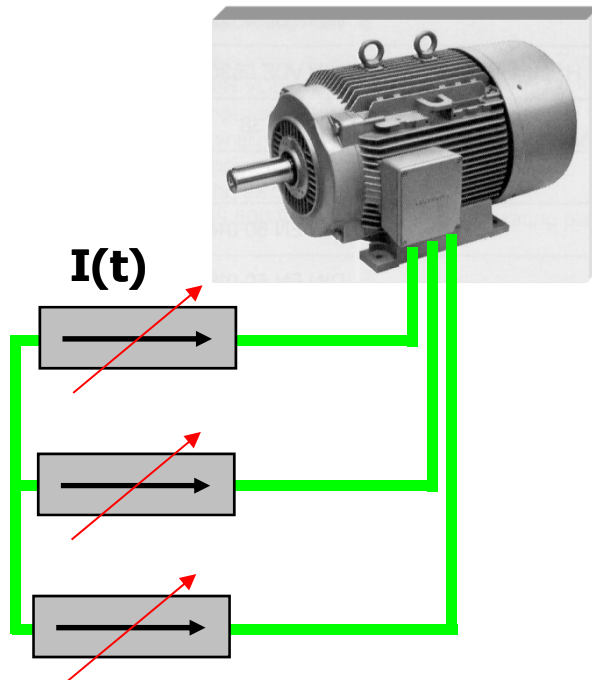
INVERSORES CSI ("*Current Source Inverters*")



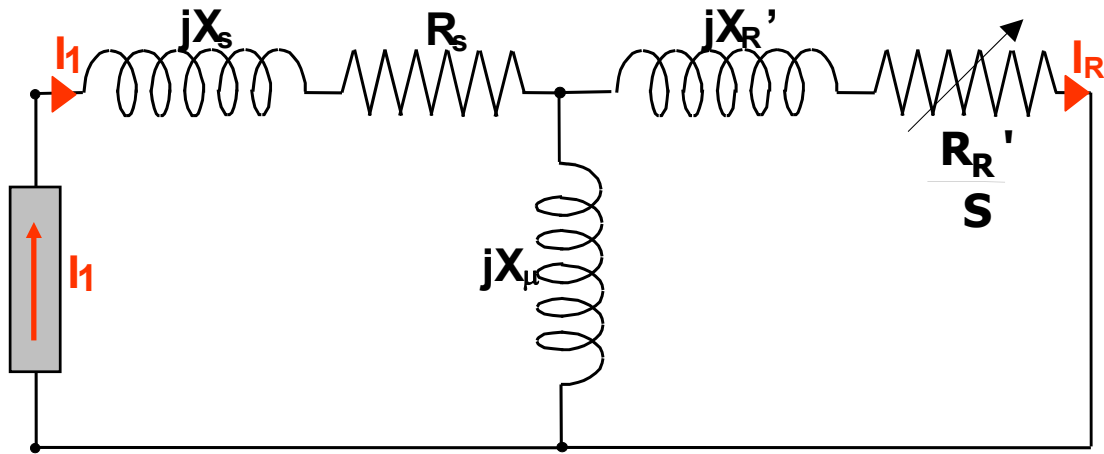
EL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR Y EN PARTICULAR SU CARACTERÍSTICA MECÁNICA ES TOTALMENTE DIFERENTE DE LA OBTENIDA CON EL MOTOR ALIMENTADO EN TENSIÓN



PRESENTA RESTRICCIONES Y LIMITACIONES PARA SU USO CON ESTE TIPO DE ALIMENTACIÓN. AUNQUE EL INVERSOR ES EL MÁS ROBUSTO



El motor asíncrono alimentado en corriente II



MOTOR ALIMENTADO CON FUENTE DE CORRIENTE

$$T_I = 3 \cdot p \frac{R_R'}{S \cdot \omega_1} \cdot I_R'^2$$



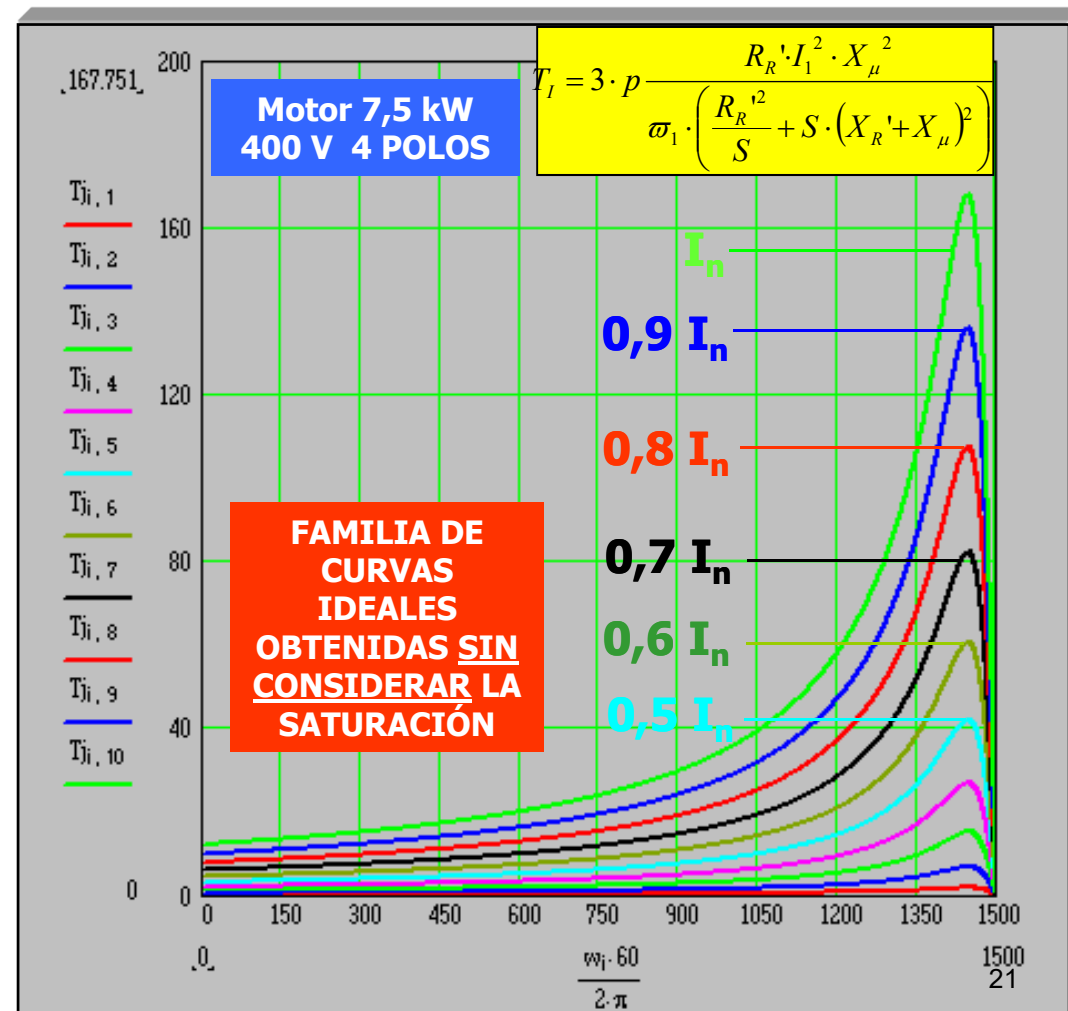
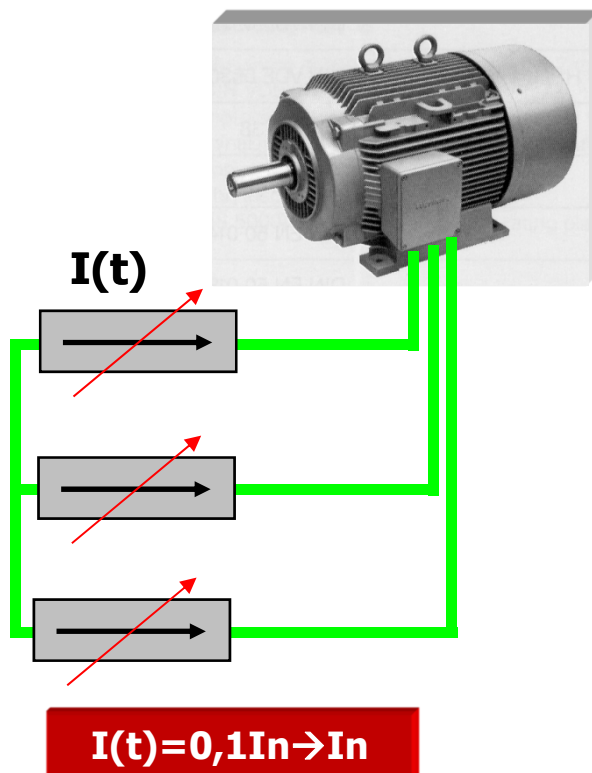
$$T_I = 3 \cdot p \frac{R_R'}{S \cdot \omega_1} \cdot$$

$$I_1 \cdot \frac{X_\mu}{\sqrt{\left(\frac{R_R'}{S}\right)^2 + (X_R' + X_\mu)^2}} \Bigg]^2$$

$$T_I = 3 \cdot p \frac{R_R' \cdot I_1^2 \cdot X_\mu^2}{\omega_1 \cdot \left(\frac{R_R'^2}{S} + S \cdot (X_R' + X_\mu)^2 \right)}$$

El motor asíncrono alimentado en corriente III

EL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO EN CORRIENTE

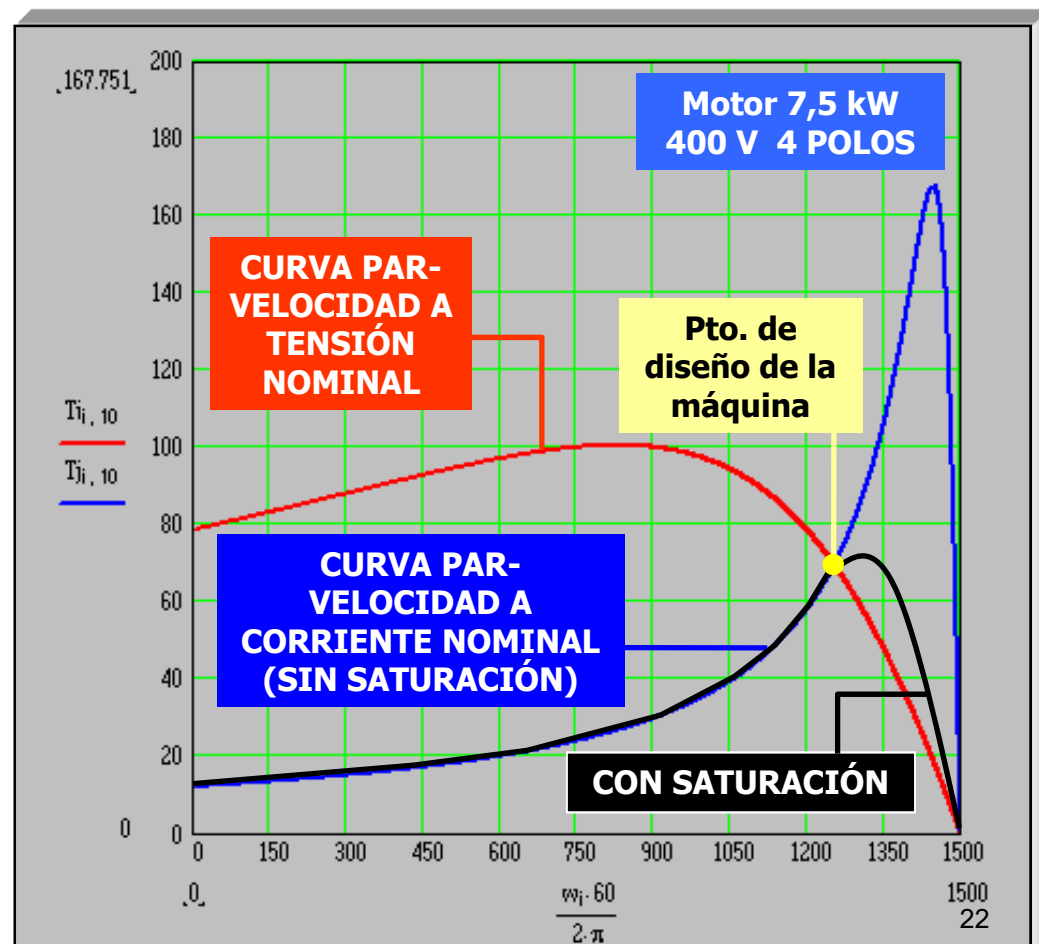


El motor asíncrono alimentado en corriente IV

EL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO EN CORRIENTE

LA CARACTERÍSTICA MECÁNICA DEL MOTOR ALIMENTADO A TENSIÓN NOMINAL Y LA CORRESPONDIENTE A LA ALIMENTACIÓN EN CORRIENTE NOMINAL SE CORTAN EN EL PUNTO DE DISEÑO DE LA MÁQUINA

TODOS PUNTOS DE LA CURVA DEL MOTOR ALIMENTADO EN CORRIENTE SITUADOS A LA DERECHA DE LA CURVA NOMINAL DE TENSIÓN HACEN QUE LA MÁQUINA TRABAJE SATURADA (Corresponden a tensiones superiores a la tensión nominal)



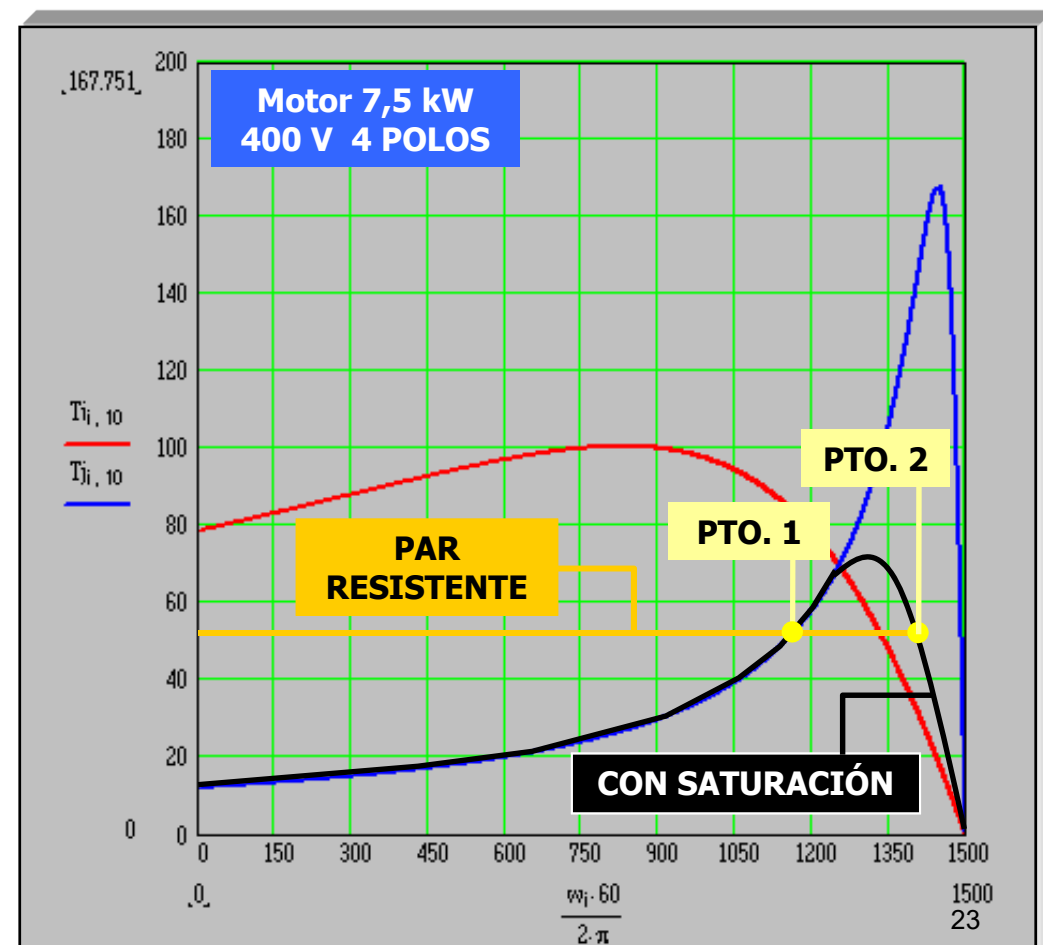
El motor asíncrono alimentado en corriente V

EL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO EN CORRIENTE

EL MOTOR ALIMENTADO EN CORRIENTE DEBERÍA TRABAJAR EN EL PUNTO 1 O EN EL PUNTO 2 DE LA CURVA REAL DE ALIMENTACIÓN EN CORRIENTE CON SATURACIÓN

EN EL PUNTO 2 EL MOTOR ESTARÍA SATURADO. EL PUNTO 1 ES UN PUNTO DE FUNCIONAMIENTO INESTABLE

ES NECESARIO UN SISTEMA DE CONTROL QUE PERMITA QUE EL MOTOR TRABAJE EN LA ZONA INESTABLE. NO ES POSIBLE EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR EN BUCLE ABIERTO



El motor asíncrono alimentado a frecuencia variable I

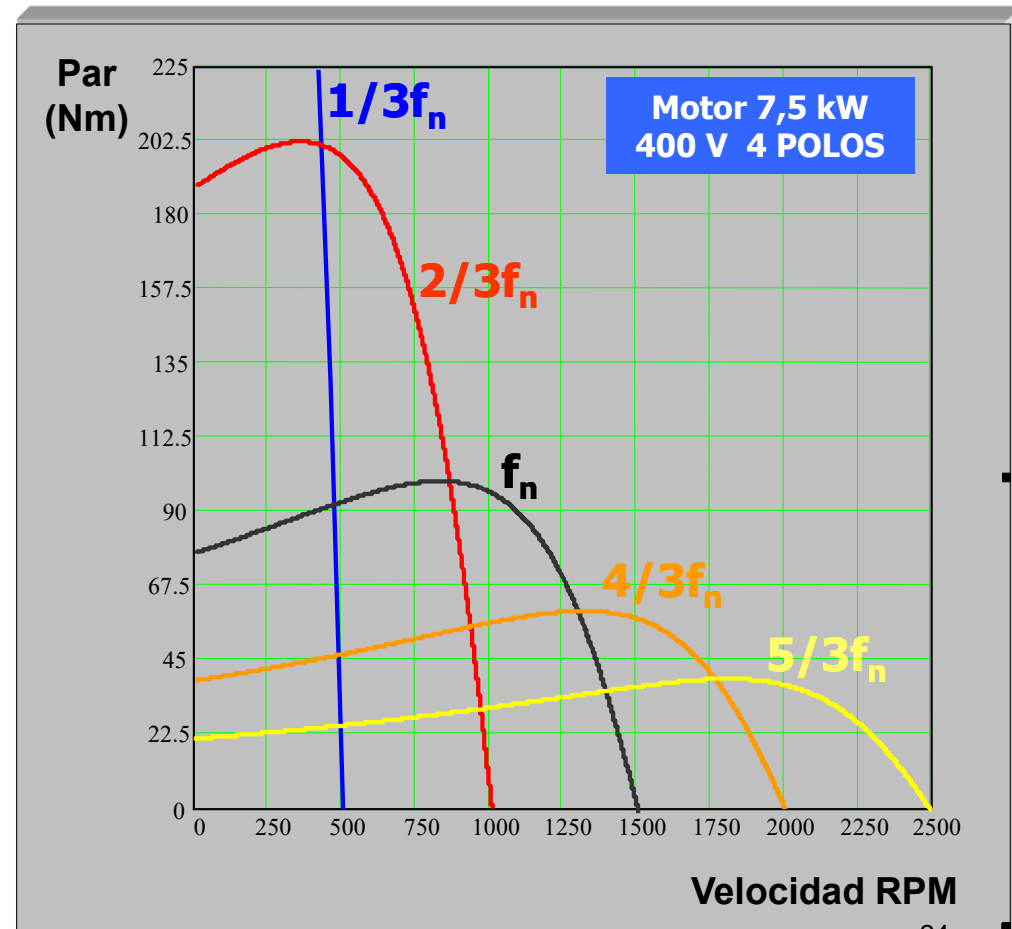
**MOTOR ASÍNCRONO
ALIMENTADO A FRECUENCIA
VARIABLE Y TENSIÓN
CONSTANTE (La nominal U_1)**

$$E_F = 4,44 \cdot f \cdot N_{e_s} \cdot \varepsilon_{b_s} \cdot \Phi_{P_{MAX}}$$

E_F PUEDE
APROXIMARSE COMO:

$$E_F \cong 0,97 \cdot U_1$$

$$\Phi_{P_{Max}} = \frac{0,97 \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_{e_s} \cdot \varepsilon_{b_s}}$$



El motor asíncrono alimentado a frecuencia variable II

**MOTOR ASÍNCRONO
ALIMENTADO A FRECUENCIA
VARIABLE Y TENSIÓN
CONSTANTE (La nominal U_1)**

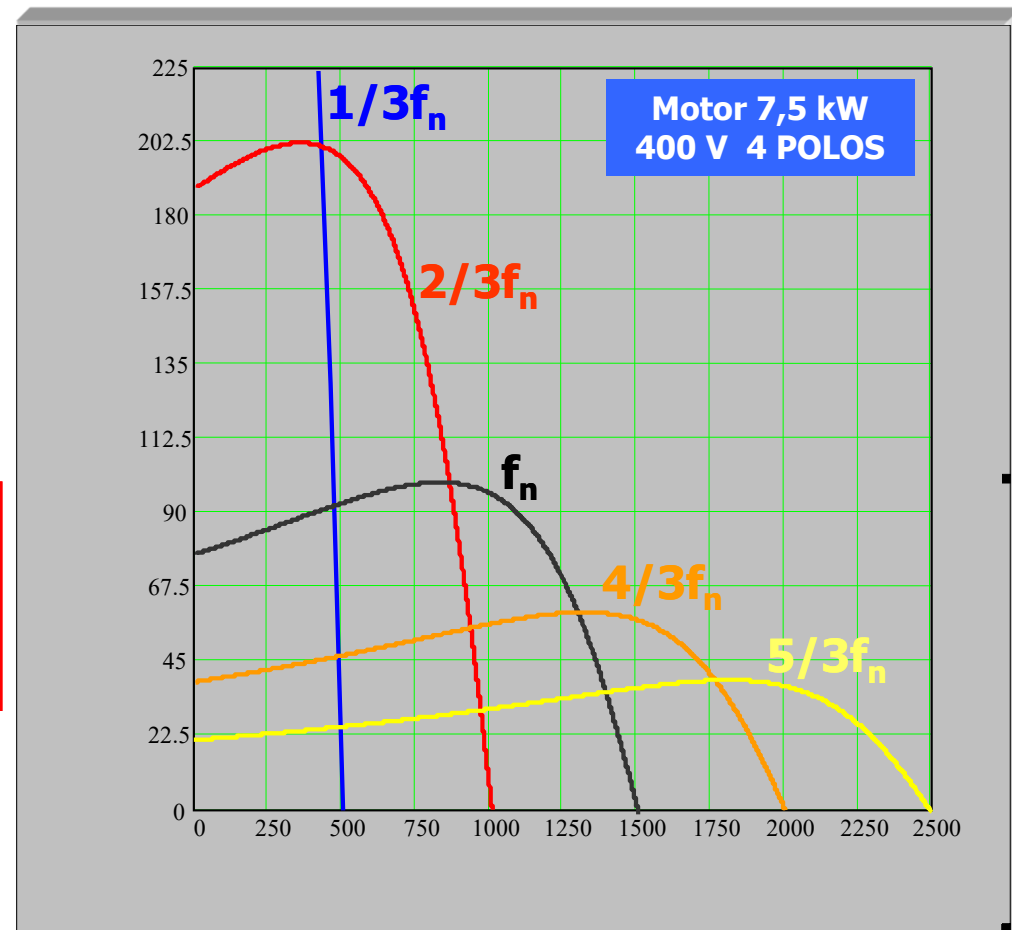
$$\Phi_{P_{Max}} = \frac{0,97 \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_{es} \cdot \varepsilon_{bs}}$$

$$f < f_n \rightarrow \Phi_{P_{Max}} > \Phi_{P_{Max}Diseño}$$

**MAYOR PAR MOTOR PERO
MÁQUINA SATURADA**

$$f > f_n \rightarrow \Phi_{P_{Max}} < \Phi_{P_{Max}Diseño}$$

**MÁQUINA CON BAJA CARGA
MAGNÉTICA: MENOR PAR
MOTOR (< Nominal)**



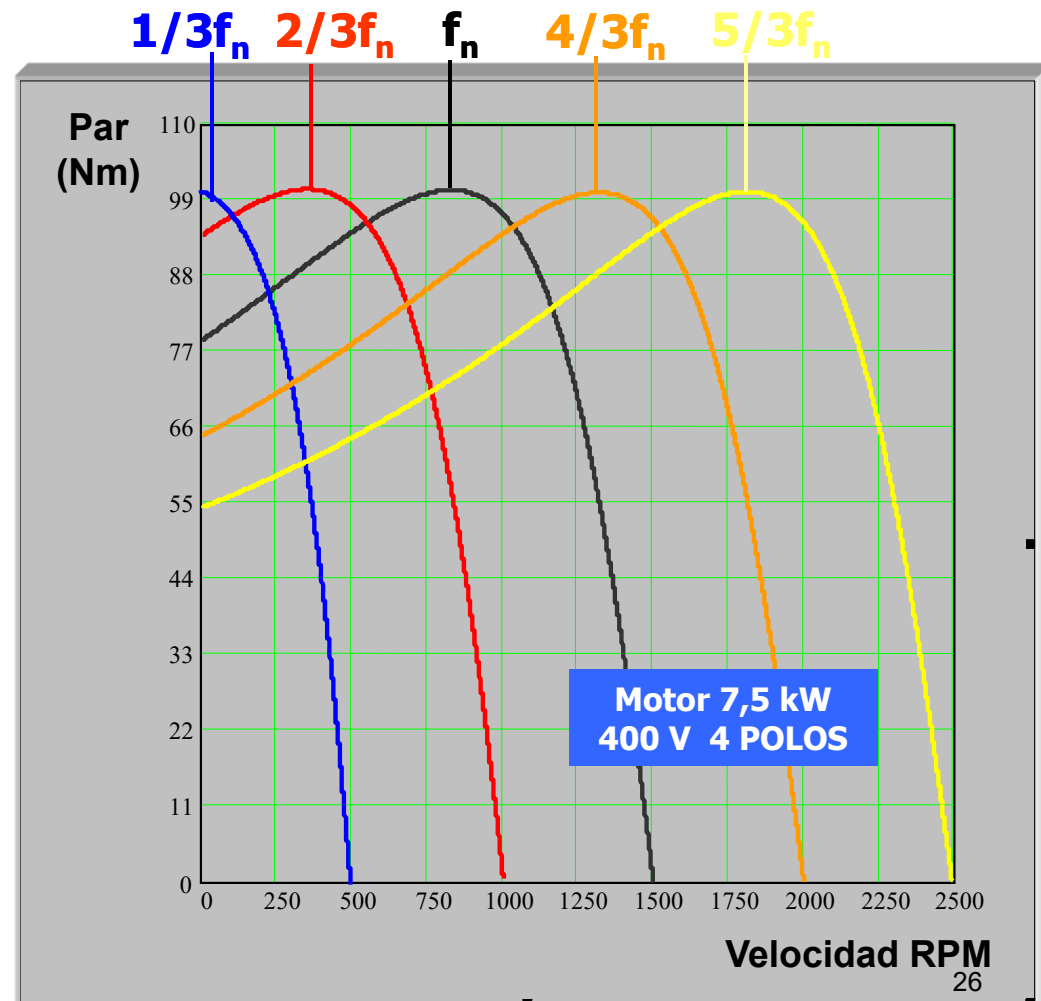
El motor asíncrono alimentado a frecuencia variable III

**MOTOR ASÍNCRONO
ALIMENTADO CON FLUJO
CONSTANTE (Relación $E/f \approx$
 $V/f = \text{cte}$)**

MANTENIENDO LA RELACIÓN $V/f=K$
SE MANTIENE CONSTANTE EL
FLUJO Y POR TANTO LA CARGA
MAGNÉTICA

LOS PARES MÁXIMOS SON
IDÉNTICOS A LAS DISTINTAS
FRECUENCIAS DE ALIMENTACIÓN Y
LAS CURVAS PAR-VELOCIDAD
PARALELAS

EL MOTOR NO SUFRE SATURACIÓN
Y ES POSIBLE ACCIONARLO EN UN
AMPLIO RANGO DE f



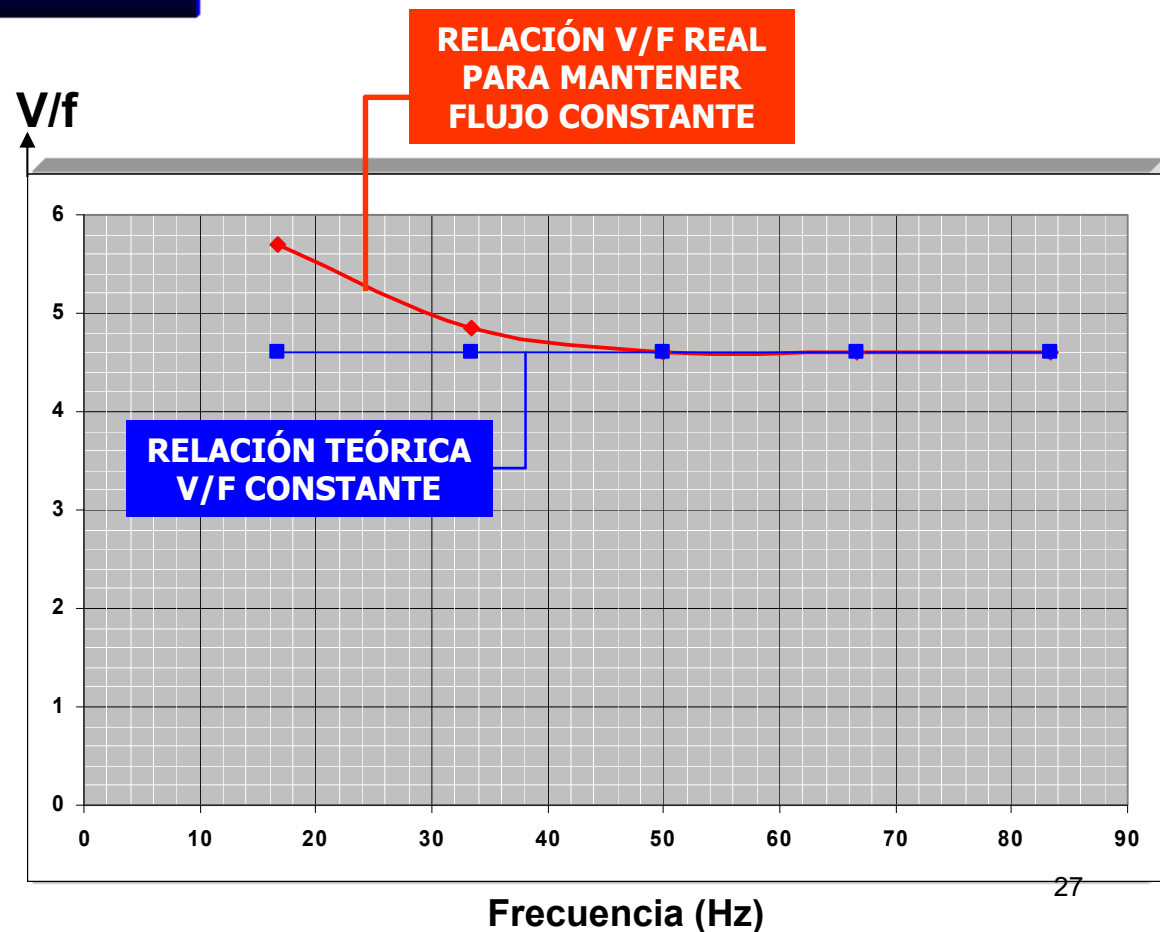
El motor asíncrono alimentado a frecuencia variable III

MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO CON FLUJO CONSTANTE (Relación $V/f = \text{cte}$)

EN LA PRÁCTICA NO ES POSIBLE MANTENER $V/f = K$

EL FLUJO SE MANTENDRÍA CONSTANTE EN EL CASO DE QUE LA RELACIÓN $E/f = K$

A BAJAS FRECUENCIAS (por tanto para $V/f = \text{Cte}$ también bajan tensiones) ES NECESARIO SUBIR LIGERAMENTE LA TENSIÓN (o mejor dicho no bajarla tanto) PARA MANTENER EL PAR, YA QUE LA CAÍDA DE TENSIÓN EN R_s Y X_s YA NO ES DESPRECIABLE FRENTE A ESTE VALOR REDUCIDO DE LA TENSIÓN APLICADA A LA ALIMENTACIÓN DE LA MÁQUINA



Inversores VSI ("*Voltage Source Inverters*") trifásicos VI

**CONTROL DE LAS
VARIABLES DE SALIDA
DEL INVERSOR VSI**

MODIFICANDO LAS FRECUENCIAS DE LAS SEÑALES DE DISPAROS DE LOS SEMICONDUCTORES DEL INVERSOR ES POSIBLE VARIAR LA FRECUENCIA DE LAS TENSIONES DE SALIDA



**CONTROL DEL MOTOR A
FRECUENCIA VARIABLE**



UTILIZANDO COMO FUENTE PRIMARIA DEL INVERSOR UNA FUENTE DE TENSIÓN CONTINUA CONSTANTE NO ES POSIBLE REGULAR LA TENSIÓN A LA SALIDA DEL INVERSOR



**NO ES POSIBLE REALIZAR
EL CONTROL A TENSIÓN
VARIABLE (Ni mantener
la relación V/f constante)**

PARA SOLUCIONAR ESTE PROBLEMA EL INVERSOR SE ALIMENTA DESDE UN BUS DE TENSIÓN CONTINUA VARIABLE. PARA ELLO SE UTILIZA UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO O SE INTRODUCE ENTRE LA FUENTE DE CC PRIMARIA Y EL INVERSOR UN TROCEADOR (TRENES CON CATENARIA EN CC)

Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos I: fundamentos I

MODULACIÓN EN ANCHO DE PULSO O PWM

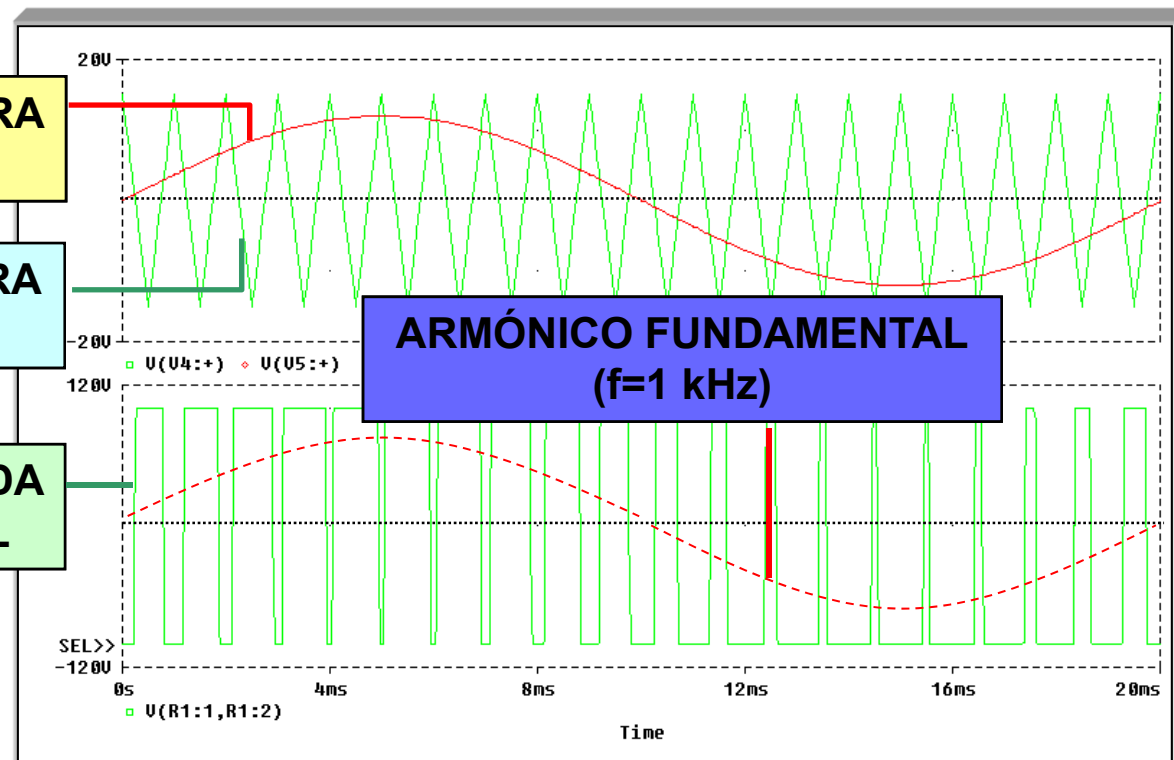


COMPARACIÓN DE UNA SEÑAL MODULADORA Y UNA PORTADORA PARA LA OBTENCIÓN DE UNA SERIE DE PULSOS CUADRADOS DE UNA DETERMINADA FRECUENCIA Y DURACIÓN VARIABLE (*"DUTY CYCLE"* VARIABLE)

**SEÑAL MODULADORA
($f=1$ kHz)**

**SEÑAL PORTADORA
($f=12$ kHz)**

**SEÑAL MODULADA
PWM SENOIDAL**

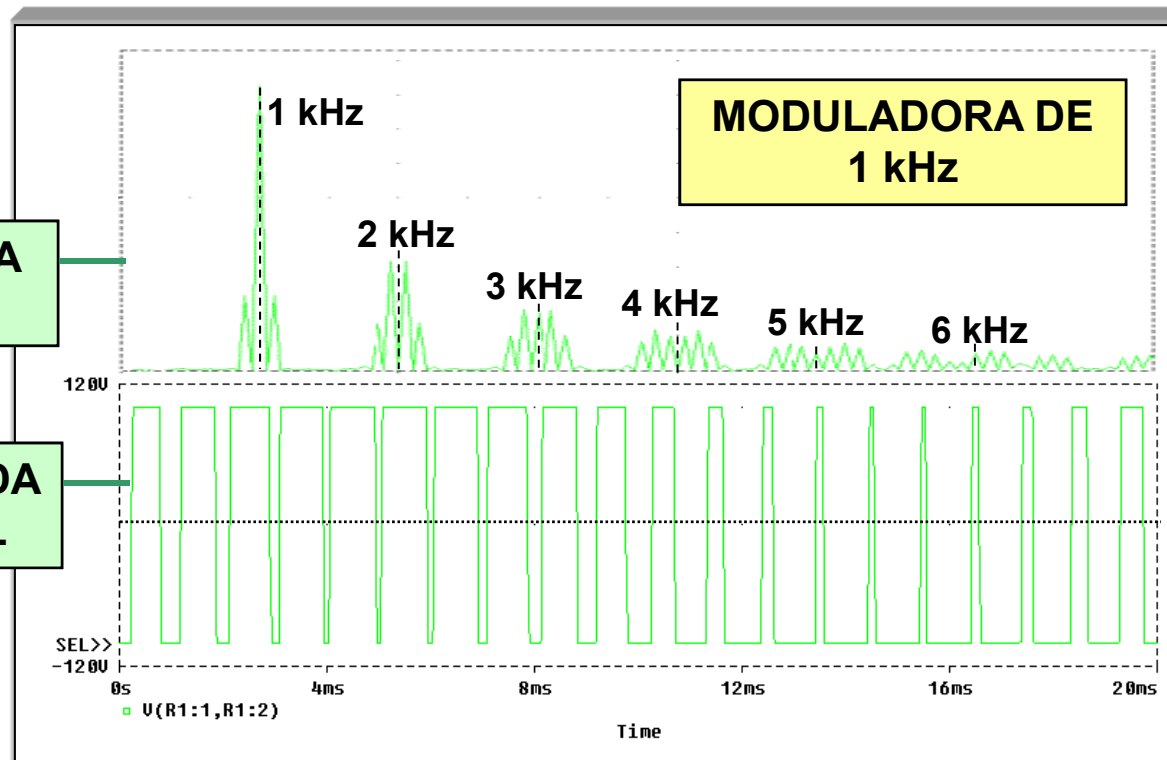


Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos I: fundamentos II

MODULACIÓN EN ANCHO DE PULSO

ESPECTRO DE LA SEÑAL PWM

SEÑAL MODULADA PWM SENOIDAL



MEDIANTE EL FILTRADO DE LA SEÑAL MODULADA ES POSIBLE OBTENER UNA SEÑAL CON UN CONTENIDO ARMÓNICO MUY SIMILAR AL DE LA SEÑAL MODULADORA SE PUEDEN UTILIZAR DIFERENTES TIPOS DE SEÑALES MODULADORAS: SENOIDAL, CUADRADA, ETC.

Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos I: fundamentos III

MODULACIÓN EN ANCHO DE PULSO

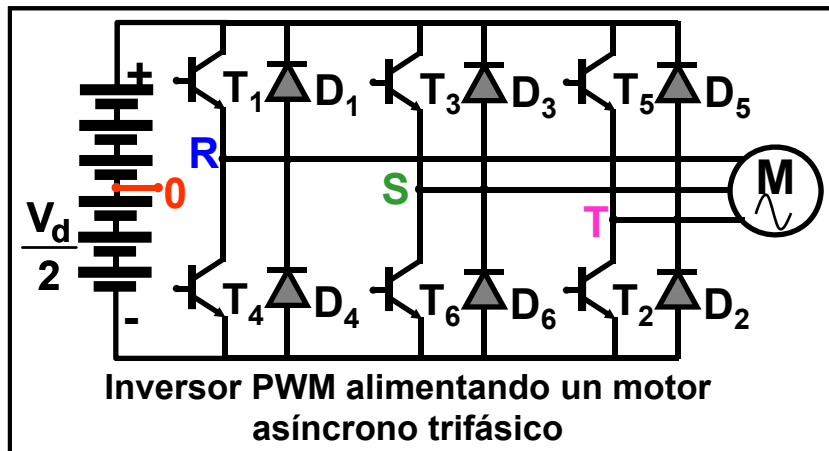
LA AMPLITUD DE LA SEÑAL MODULADA ES PROPORCIONAL A LA AMPLITUD DE LA SEÑAL MODULADORA

LA FRECUENCIA DEL ARMÓNICO FUNDAMENTAL DE LA SEÑAL MODULADA ES IDÉNTICA A LA FRECUENCIA DEL ARMÓNICO FUNDAMENTAL DE LA SEÑAL MODULADORA

SE DENOMINA MODULACIÓN EN AMPLITUD O ÍNDICE DE MODULACIÓN (m_a) A LA RELACIÓN ENTRE LA AMPLITUD DE LA SEÑAL MODULADORA Y LA PORTADORA. VARÍA ENTRE 0 Y 1: CUANDO VALE 0 LA TENSIÓN DE SALIDA ES MÍNIMA, CUANDO VALE 1 ES MÁXIMA

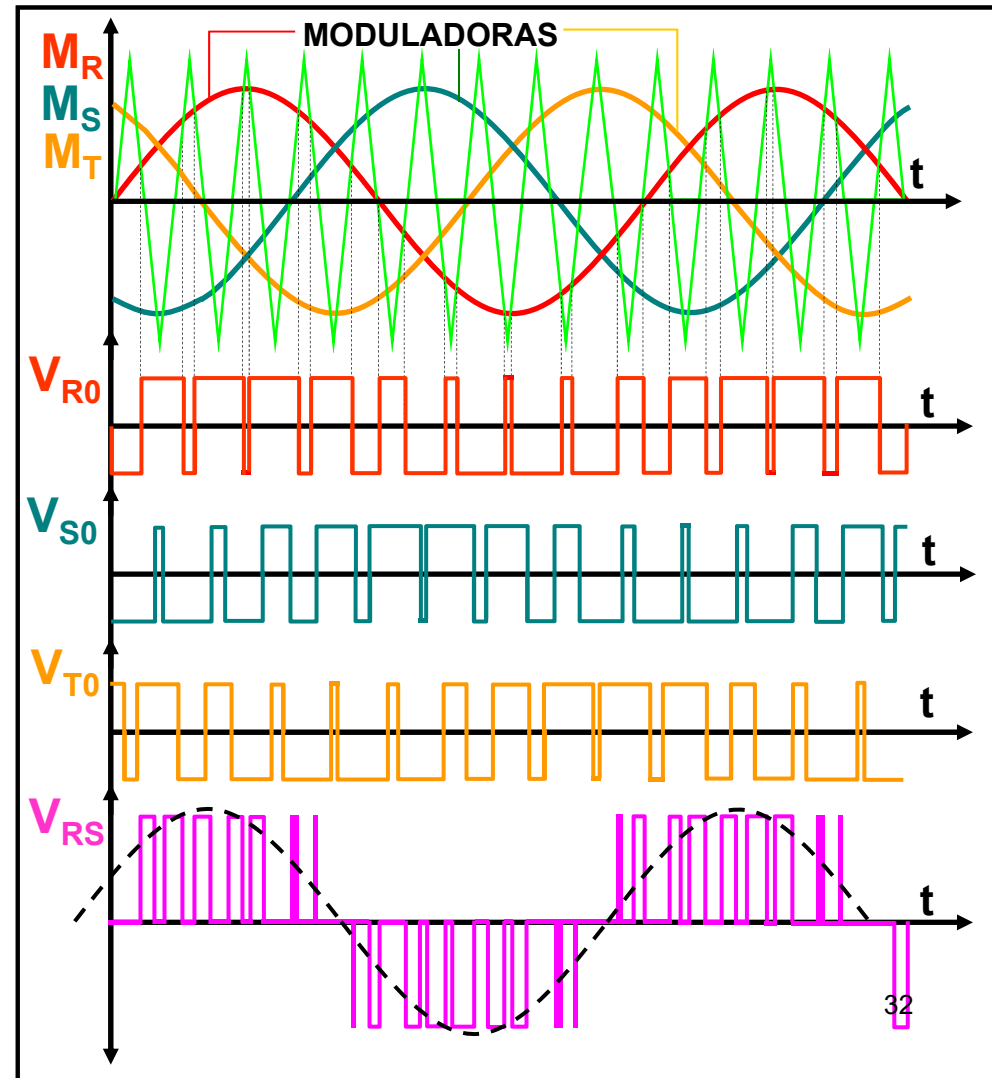
SE DENOMINA MODULACIÓN EN FRECUENCIA (m_f) A LA RELACIÓN ENTRE LA FRECUENCIA DE LA SEÑAL PORTADORA Y LA MODULADORA. ESTA RELACIÓN ES NORMALMENTE MÚLTIPLO DE 3 Y MAYOR QUE 9

Inversores PWM ("*Pulse Width Modulation*") trifásicos I: fundamentos IV



LA RELACIÓN ENTRE LAS FRECUENCIAS DE LA PORTADORA Y LAS MODULADORAS TIENE QUE SER MÚLTIPLO DE 3 PARA QUE SE OBTENGAN LAS 3 ONDAS TRIFÁSICAS EQUILIBRADAS DESFASADAS 120°

EN INVERSORES COMERCIALES LA MODULACIÓN EN FRECUENCIA m_f SUELE SER UN VALOR ELEVADO (>9). LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN EN VARIADORES CON IGBT's ES TÍPICAMENTE DE 4 – 10 kHz



Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos II: armónicos I

ARMÓNICOS DE LAS TENSIONES MODULADAS PWM

LOS INVERSORES PWM PRESENTAN MENOR INYECCIÓN DE ARMÓNICOS AL MOTOR Y A LA RED QUE LOS RECTIFICADORES CONTROLADOS Y QUE LOS INVERSORES VSI Y CSI

LOS ARMÓNICOS DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN PWM RESPONDEN A LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:

Cuando los dos índices n y m son ambos pares o impares NO HAY armónicos en la tensión de alimentación

$$[n \cdot m_f \pm m] \cdot f_{\text{MODULADORA}}$$

0,1,2,3.....

$$m_f = \frac{f_{\text{PORTADORA}}}{f_{\text{MODULADORA}}}$$

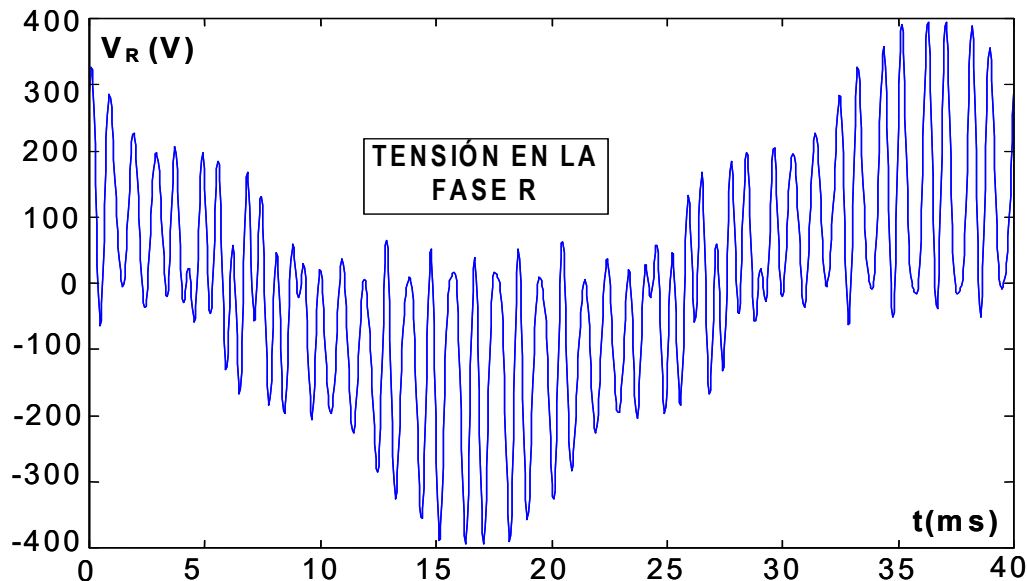
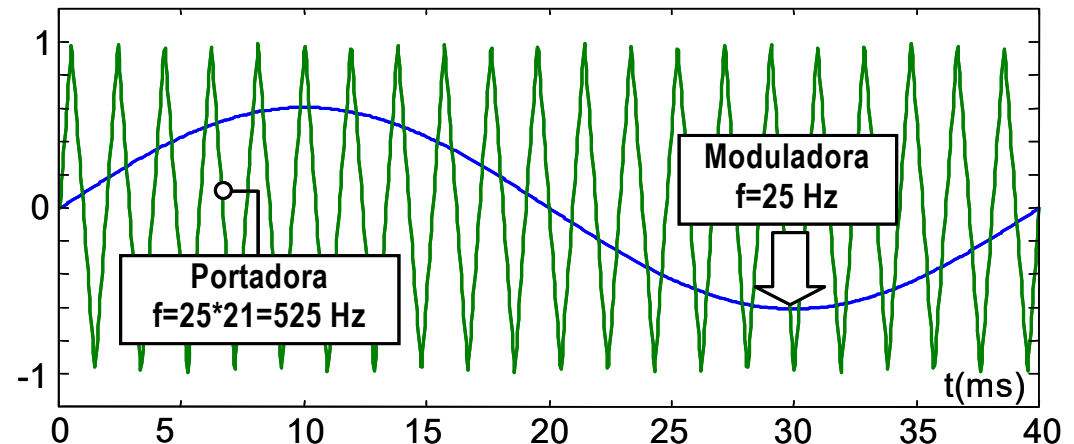
0,1,2,3.....

$$\begin{aligned} n = 1 & \longrightarrow [m_f \pm 2, 4, 6 \dots] \cdot f_{\text{MODULADORA}} \\ n = 2 & \longrightarrow [2 \cdot m_f \pm 1, 3, 5 \dots] \cdot f_{\text{MODULADORA}} \end{aligned}$$

Inversores PWM ("*Pulse Width Modulation*") trifásicos II: armónicos II

SIMULACIÓN

- ♦ Tensión nominal 380 V
- ♦ Frecuencia nominal 50Hz
- ♦ Frecuencia de funcionamiento 25 Hz
- ♦ Modulación en frecuencia $m_f=21$
- ♦ Velocidad 675 rpm (Bucle Cerrado)
- ♦ Pares de polos $p=2$.
- ♦ Par medio 16 Nm



$$[m_f \pm 2, 4, 6 \dots] \cdot f_{\text{MODULADORA}}$$

$$\rightarrow [21 \pm 2, 4, 6 \dots] \cdot 25$$

475 Hz	425 Hz	375 Hz
575 Hz	625 Hz	675 Hz

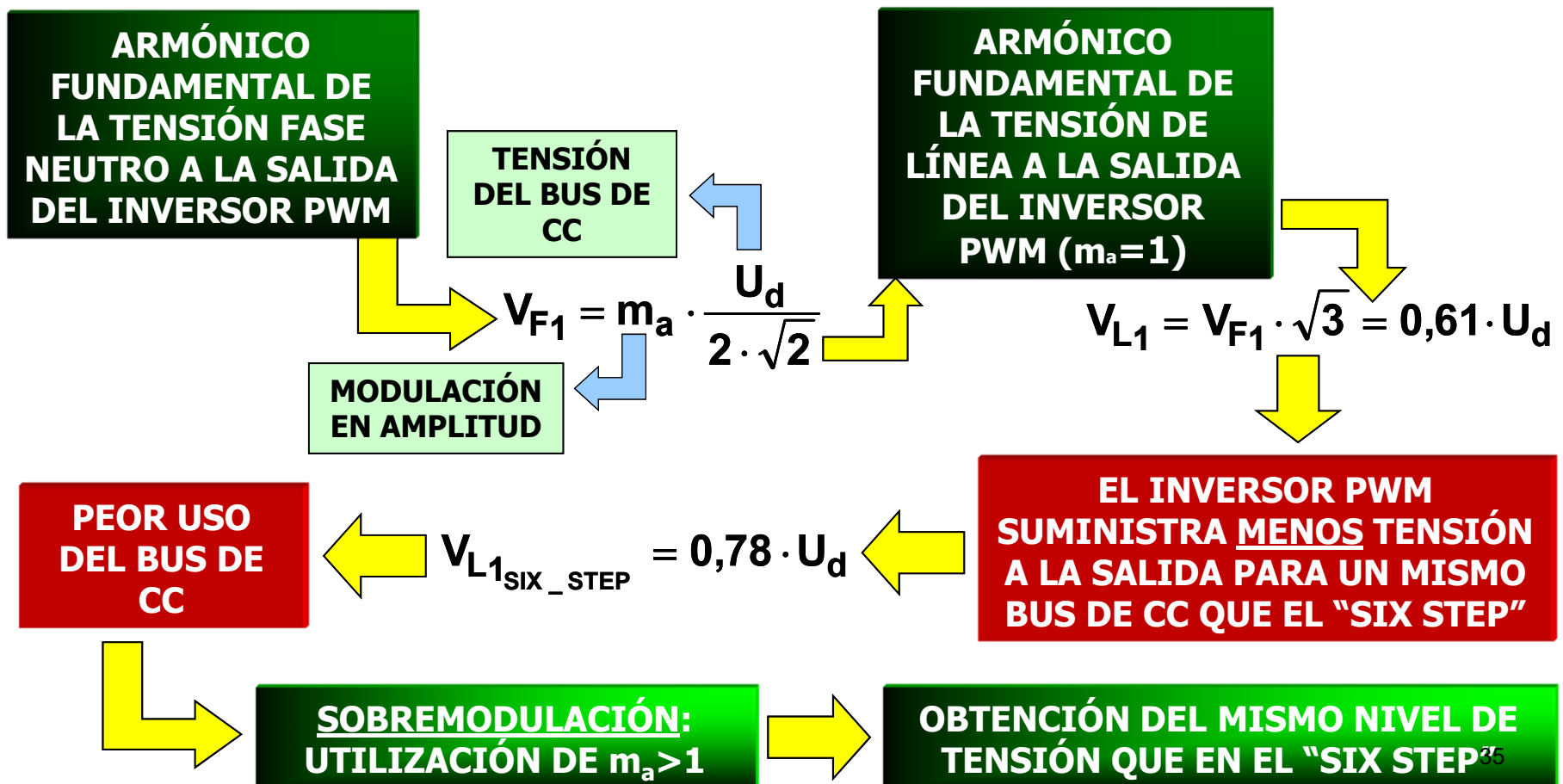
$$[2 \cdot m_f \pm 1, 3, 5 \dots] \cdot f_{\text{MODULADORA}}$$

$$\rightarrow [2 \cdot 21 \pm 1, 3, 5 \dots] \cdot 25$$

1025 Hz	975 Hz	925 Hz
1075 Hz	1125 Hz	1175 Hz

Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos II: armónicos IV

AMPLITUDES DE LOS ARMÓNICOS



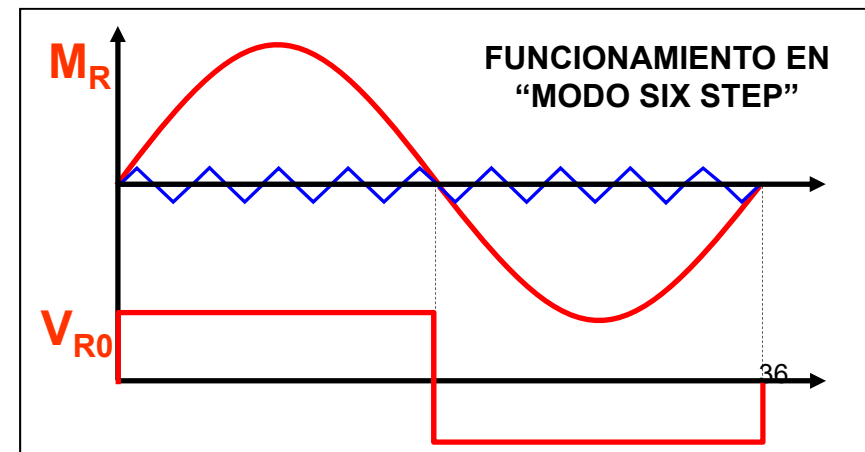
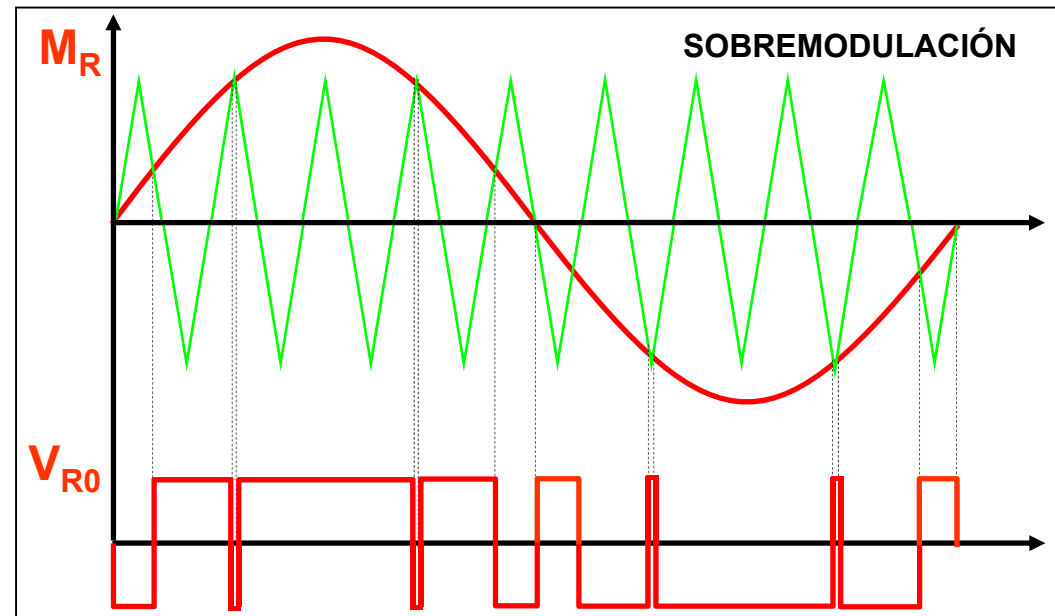
Inversores PWM (*"Pulse Width Modulation"*) trifásicos II: armónicos V

SOBREMODULACIÓN

LA SOBREMÓDULACIÓN CONSISTE EN UTILIZAR UNA SEÑAL MODULADORA DE MAYOR AMPLITUD QUE LA PORTADORA

DE ESTE MODO DESAPARECEN LA MAYOR PARTE DE LAS INTERSECCIONES ENTRE PORTADORA Y MODULADORA AUMENTANDO EL VALOR EFICAZ DE LA TENSIÓN DE SALIDA

EN EL LÍMITE, PARA VALORES MUY ELEVADOS DE LA AMPLITUD DE LA ONDA MODULADORA, LA INTERSECCIÓN CON LA PORTADORA SÓLO APARECE EN LOS PASOS POR CERO DE LA SEÑAL. ENTONCES EL INVERSOR FUNCIONA COMO UN SIX STEP



Cicloconvertidores trifásicos I: conceptos básicos

CICLOCONVERTIDORES TRIFÁSICOS

CONVERTIDORES CA - CA

TRANSFORMAN UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSIONES DE FRECUENCIA f EN OTRO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSIONES DE FRECUENCIA f' MÁS BAJA, VARIABLE Y DE TENSIÓN VARIABLE

CONSTAN DE 2 PUENTES RECTIFICADORES TRIFÁSICOS CONTROLADOS PARA CADA FASE

LOS PUENTES SE CONECTAN EN ANTIPARALELO Y SE DISPARAN CON ÁNGULOS DE DISPARO SUPLEMENTARIOS (α y $\pi - \alpha$) RESPECTIVAMENTE QUE VARÍAN A LO LARGO DE CADA CICLO DE RED

CONTROLANDO LA MODULACIÓN DE LOS DISPAROS EN AMBOS PUENTES SE CONTROLAN LA AMPLITUD DE LA TENSIÓN Y FRECUENCIA DE SALIDA

Cicloconvertidores trifásicos I: conceptos básicos

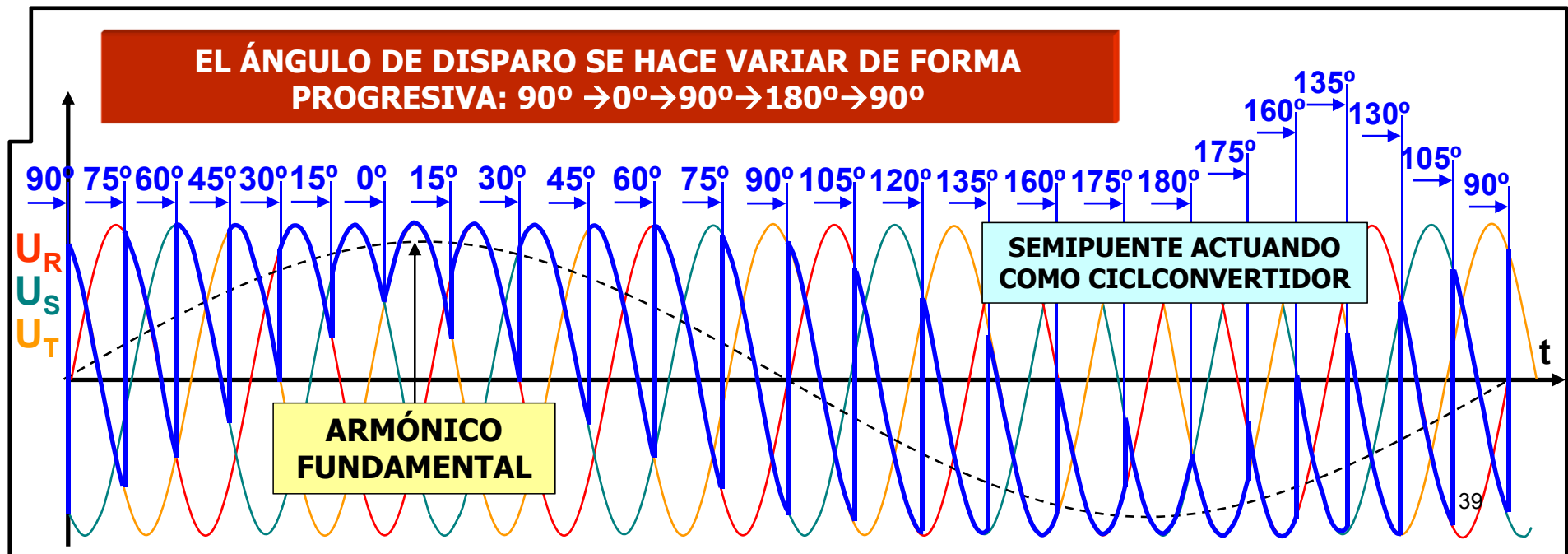


Cicloconvertidores trifásicos II: principio de funcionamiento III

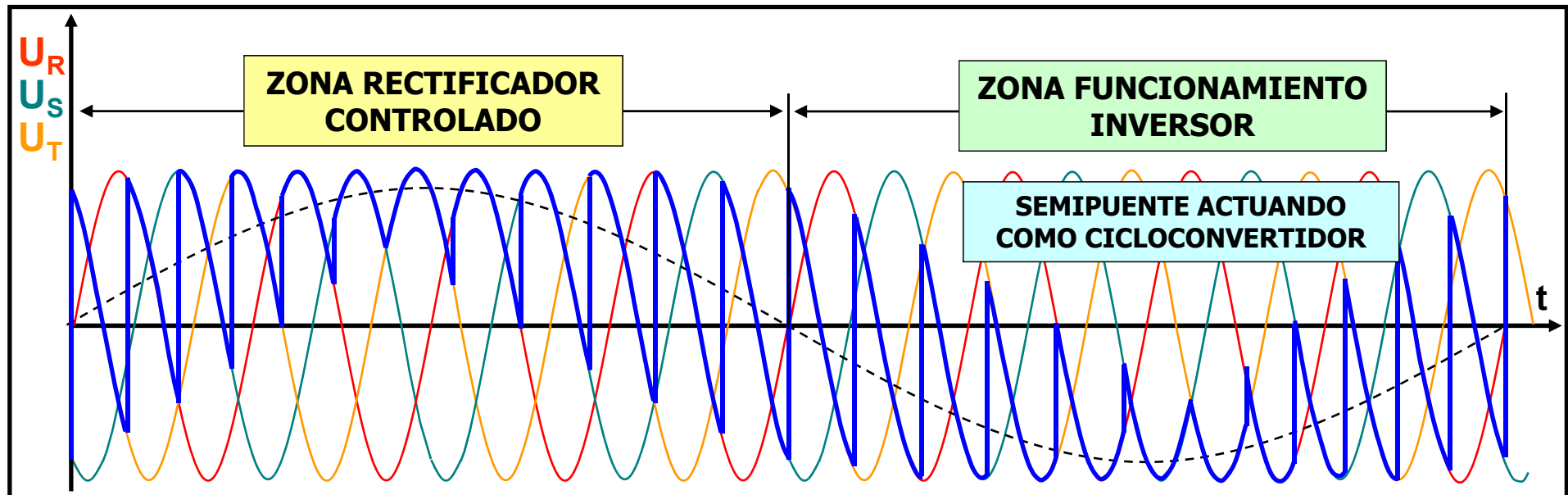
A PARTIR DEL MONTAJE EN SEMIPUENTE SE PUEDE ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL CICLOCONVERTIDOR



SI EL ÁNGULO DE DISPARO DEL SEMIPUENTE SE VA VARIANDO GRADUALMENTE, DE FORMA DINÁMICA, EN CADA SEMICICLO DE LA TENSIÓN ES POSIBLE LLEGAR A OBTENER UNA ONDA CUYO ARMÓNICO FUNDAMENTAL ES DE MÁS BAJA FRECUENCIA. DICHA ONDA SE VA "RECORTANDO" A PARTIR DE LAS TENSIONES DE ALIMENTACIÓN



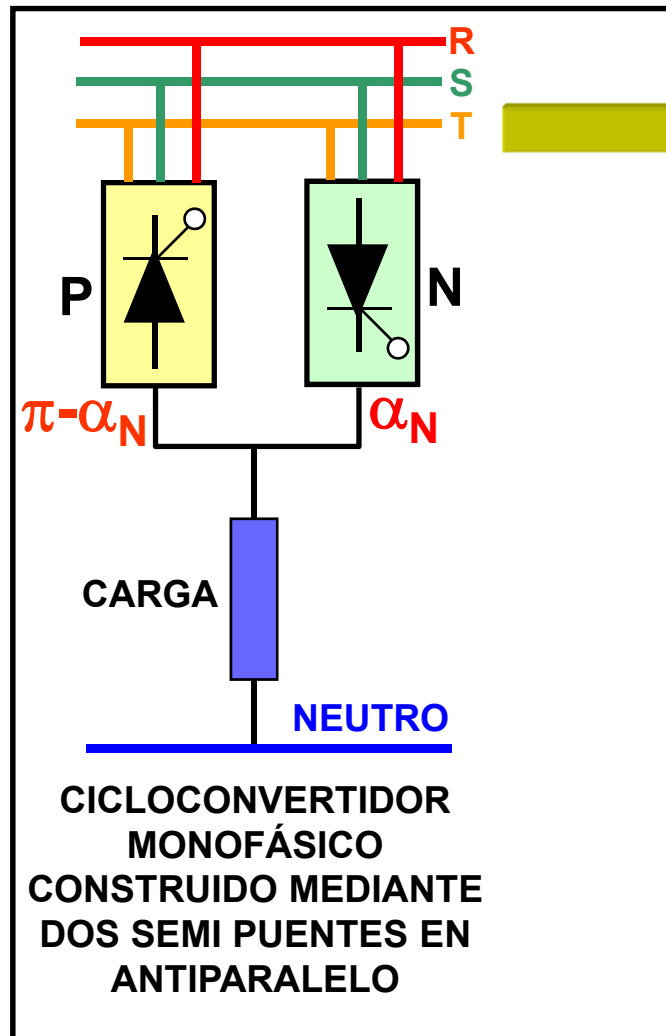
Cicloconvertidores trifásicos II: principio de funcionamiento IV



AL EXISTIR UN ÚNICO PUENTE, LA CORRIENTE SÓLO PUEDE CIRCULAR EN UN SENTIDO. PARA PODER CONSEGUIR UN CICLO COMPLETO DE CORRIENTE ALTERNA DESDE EL CICLOCONVERTIDOR A LA CARGA ES NECESARIO DISPONER DE AL MENOS DOS PUENTES CONECTADOS EN ANTIPARALELO.

CUANTO MENOR ES LA RELACIÓN ENTRE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE LA SEÑAL DE SALIDA Y LA DE ENTRADA, MÁS BAJO ES EL CONTENIDO EN ARMÓNICOS DE LA SEÑAL GENERADA Y VICEVERSA

Cicloconvertidores trifásicos II: principio de funcionamiento V



LA CONEXIÓN EN PARALELO DE LOS DOS SEMIPuentes OBLIGA A CONTROLAR SUS ÁNGULOS DE DISPARO

ES NECESARIO QUE LA TENSIÓN MEDIA APORTADA POR CADA GRUPO SEA IGUAL Y DE SIGNO CONTRARIO

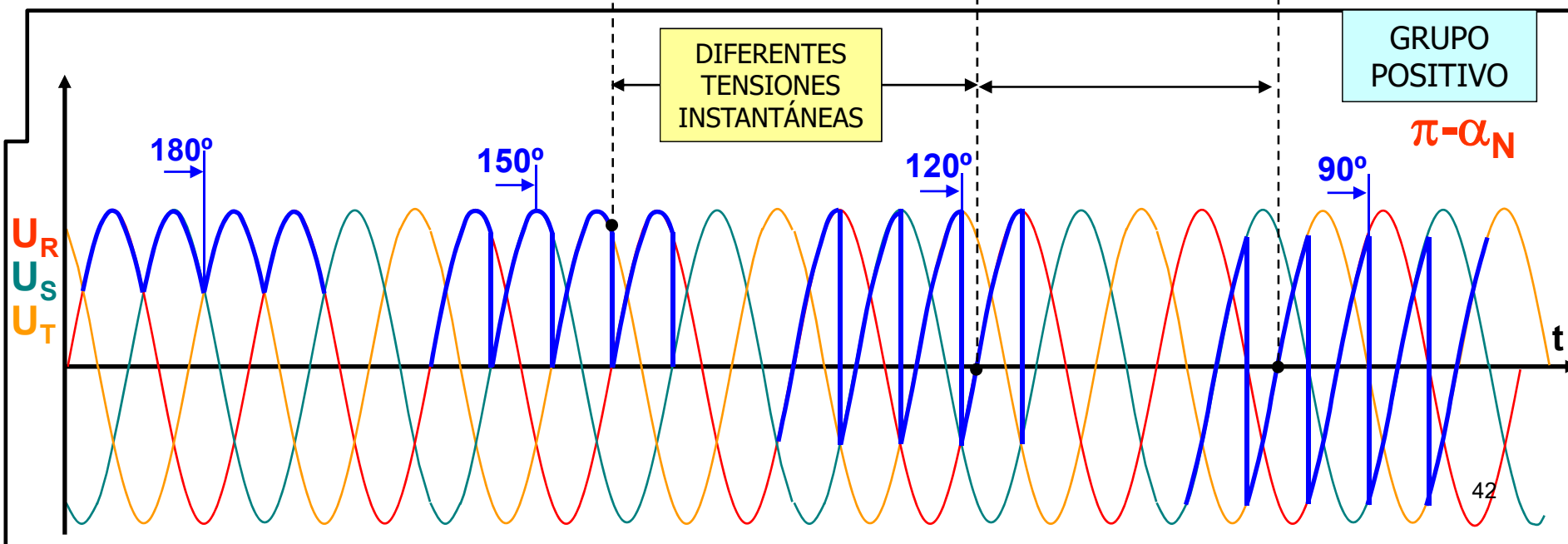
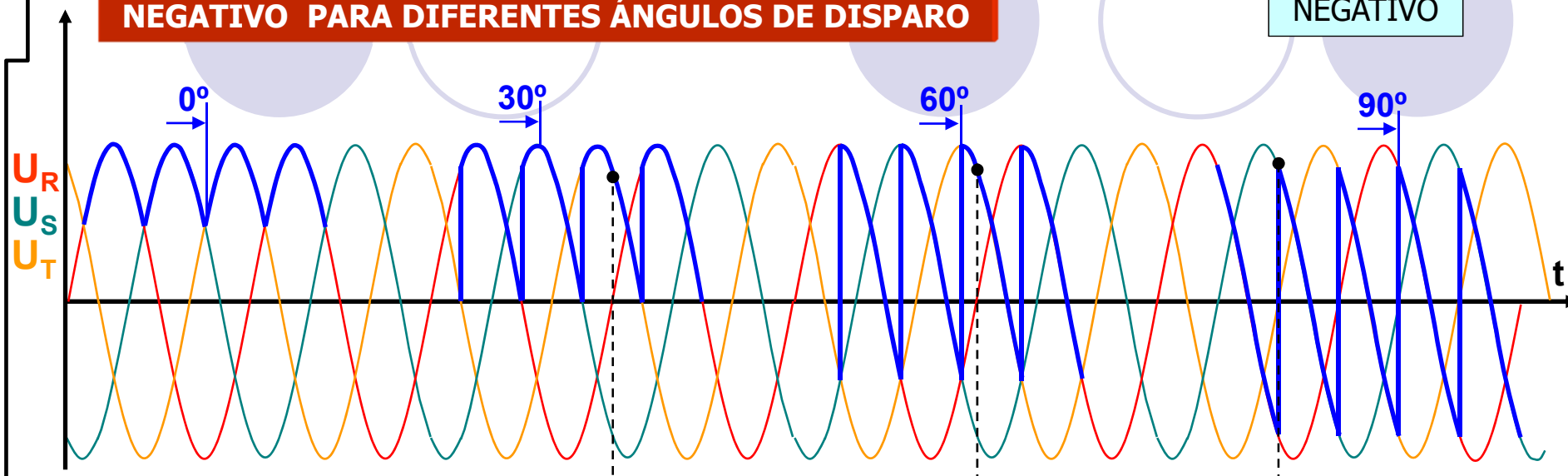
PARA ELLO, LOS ÁNGULOS DE DISPAROS DEBEN SER α_N PARA EL CONVERTIDOR NEGATIVO (N) Y $\pi - \alpha_N$ PARA EL CONVERTIDOR POSITIVO

MEDIANTE ESTE PROCEDIMIENTO SE CONSIGUEN MANTENER LAS TENSIONES MEDIAS IGUALADAS EN EL PUNTO DE ACOPLAMIENTO CON LA CARGA, PERO LAS TENSIONES INSTANTÁNEAS SON DIFERENTES

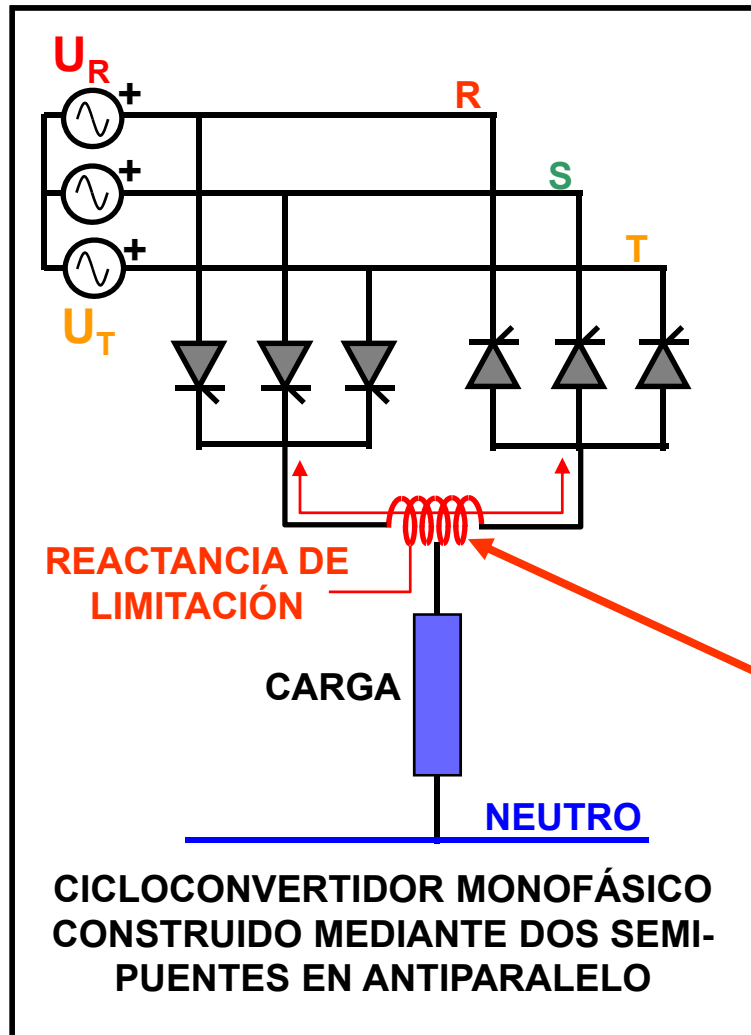
CIRCULACIÓN DE CORRIENTES ENTRE GRUPOS

TENSIÓN INSTANTÁNEA DE LOS GRUPOS POSITIVO Y NEGATIVO PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE DISPARO

GRUPO NEGATIVO α_N



Cicloconvertidores trifásicos II: principio de funcionamiento VI



LA EXISTENCIA DE VALORES INSTANTÁNEOS DE TENSIÓN DIFERENTES EN CADA GRUPO PROVOCA LA CIRCULACIÓN DE ELEVADAS CORRIENTES

EXISTEN DOS FORMAS PARA LIMITAR LA CORRIENTE CIRCULANTE ENTRE GRUPOS

INTRODUCIR UNA REACTANCIA DE LIMITACIÓN PARA LA CORRIENTE EN EL PUNTO DE ACOPLAMIENTO CON LA CARGA

UTILIZAR SISTEMAS ELECTRÓNICOS PARA LA INHIBICIÓN DE LOS PULSOS DEL SEMIPUNTO QUE NO ESTÁ APORTANDO CORRIENTE A LA CARGA

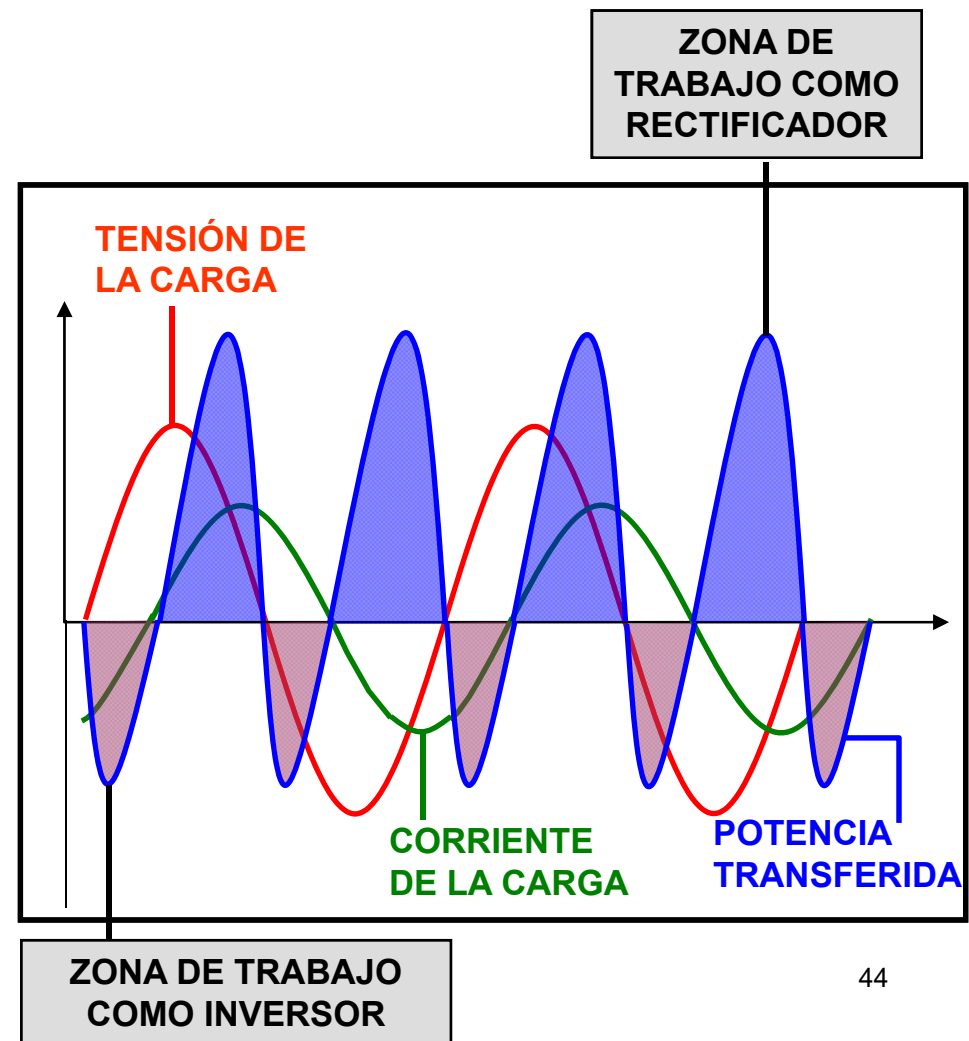
Cicloconvertidores trifásicos II: principio de funcionamiento VIII

FUNCIONAMIENTO DEL CICLOCONVERTIDOR CON CARGAS REACTIVAS

CUANDO EL CICLOCONVERTIDOR TRABAJA CON CARGAS RESISTIVAS CADA UNO DE LOS GRUPOS SUMINISTRA MEDIO CICLO DE CORRIENTE DE BAJA FRECUENCIA A SU SALIDA. NINGUNO DE LOS DOS GRUPOS TIENE NECESIDAD **DE TRABAJAR COMO INVERSOR**

TRABAJANDO CON CARGAS INDUCTIVAS LA CORRIENTE DE SALIDA DEL CICLOCONVERTIDOR ESTÁ RETRASADA RESPECTO DE LA TENSIÓN, POR TANTO, CADA GRUPO DEBE SEGUIR CONDUCIENDO INCLUSO **DESPUÉS DE HABER CAMBIADO LA POLARIDAD DE SU TENSIÓN**

EN ESE PERIODO EL GRUPO CORRESPONDIENTE TRABAJA **COMO INVERSOR** Y LA ENERGÍA SE TRANSFIERE **DE LA CARGA A LA RED**.

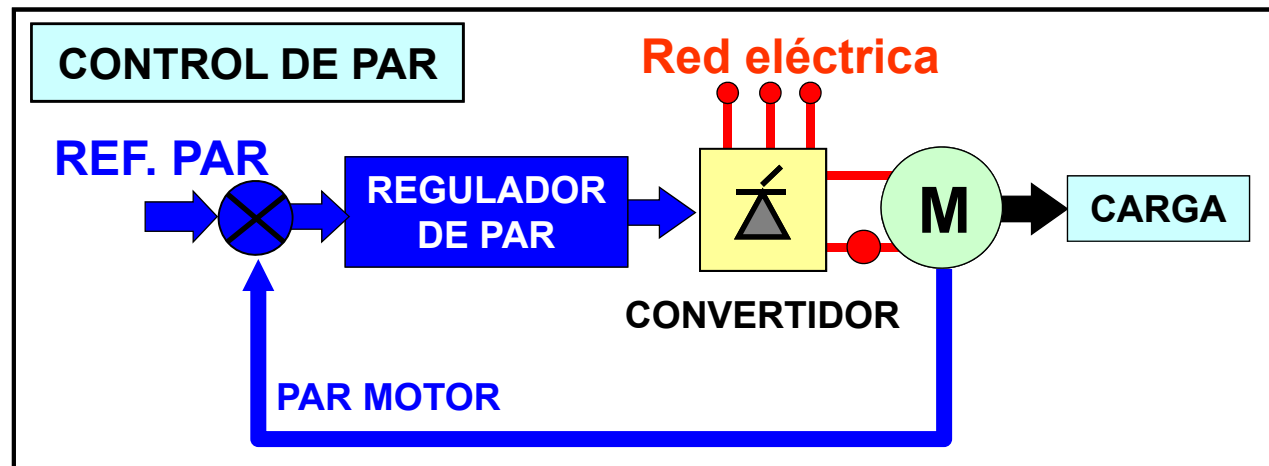


Características generales de los bucles de control para accionamientos de CA

EN BUCLES DE CONTROL PARA ACCIONAMIENTOS DE MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA (ASÍNCRONAS) ES FUNDAMENTAL EL CONTROL DEL PAR

EN LAS MÁQUINAS DE CONTINUA NO ES NECESARIO INTRODUCIR UN CONTROLADOR DE PAR POR ESTAR ÉSTE LIGADO DE FORMA DIRECTA A LA CORRIENTE DE INDUCIDO CUANDO EL FLUJO SE MANTIENE CONSTANTE

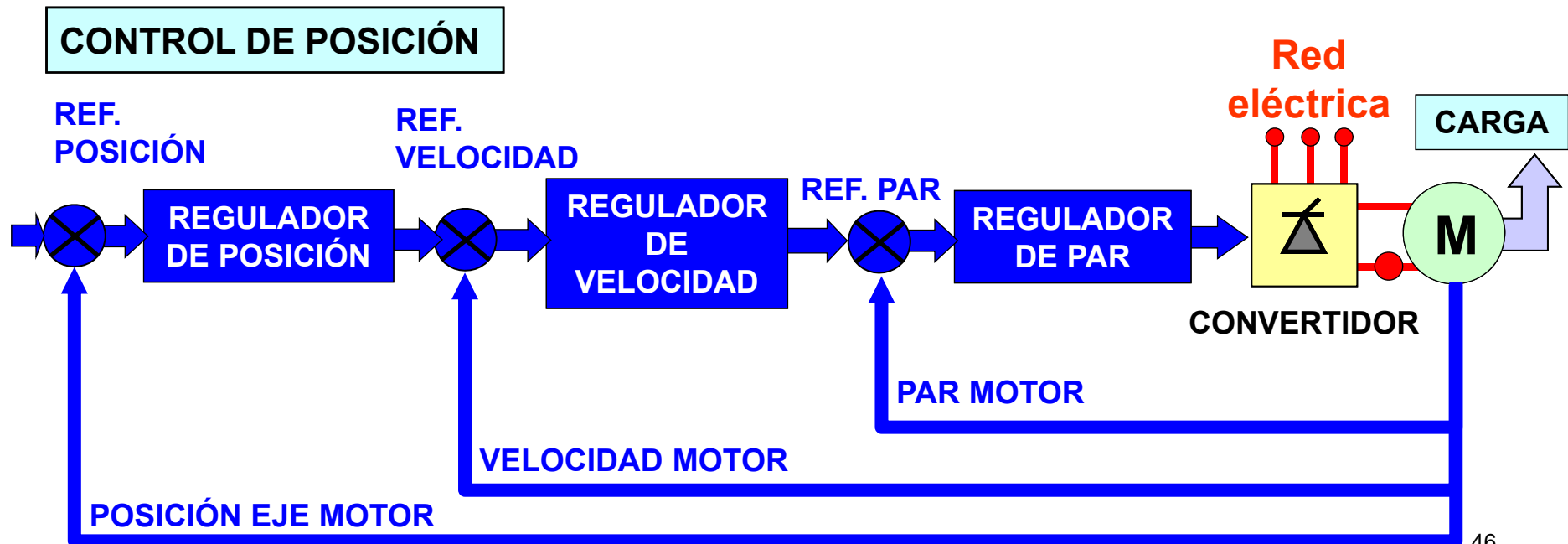
EL PUNTO DE PARTIDA PARA LOS ACCIONAMIENTOS DE MÁQUINAS DE C.A. (Especialmente motores de inducción) SERÁ UN BUCLE QUE INCLUYA UN REGULADOR DE PAR



Características generales de los bucles de control para accionamientos de CA

PARA REALIZAR EL CONTROL DE POSICIÓN SON NECESARIOS 3 BUCLES ANIDADOS DE PAR, VELOCIDAD Y POSICIÓN

EN TODOS LOS CASOS LOS BUCLES MÁS INTERNOS SON MÁS RÁPIDOS QUE LOS QUE ESTÁN SITUADOS HACIA EL EXTERIOR QUE SE VUELVEN MENOS PRIORITARIOS



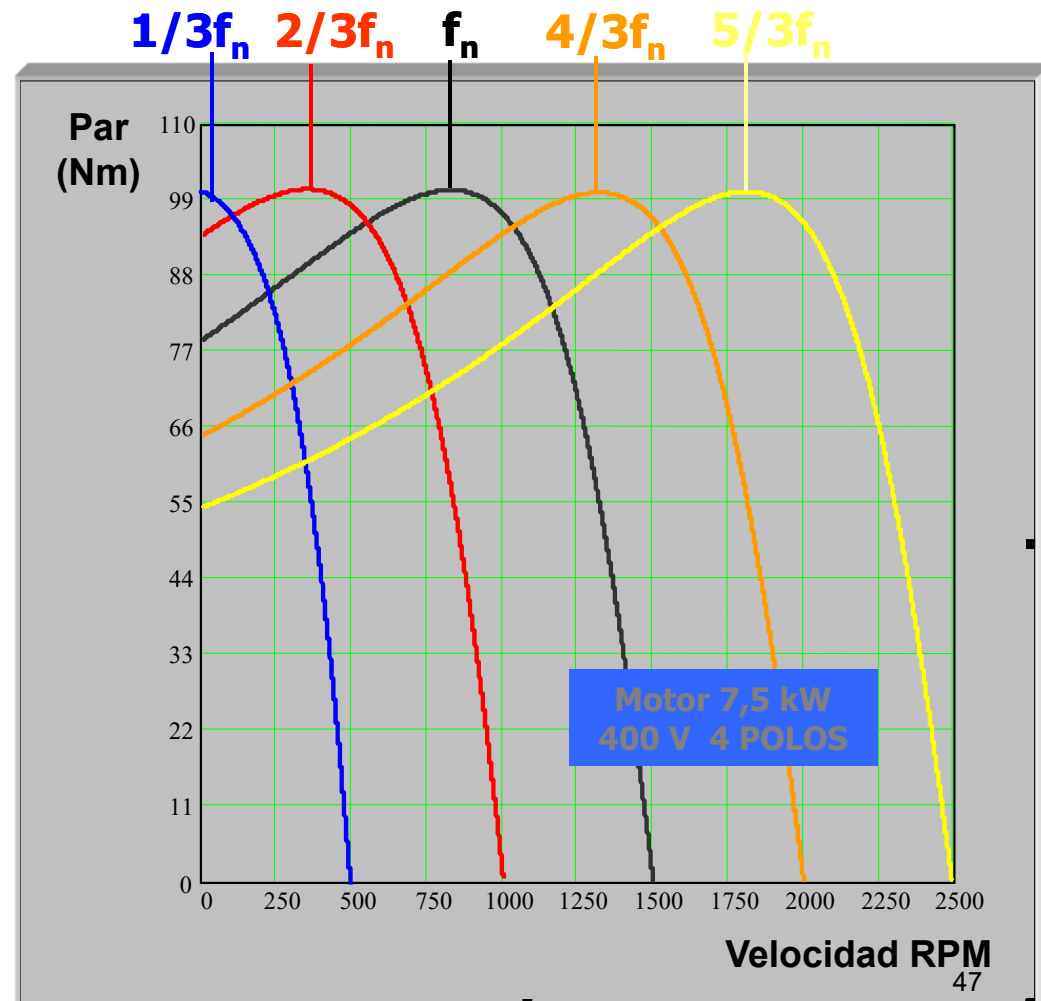
Fundamentos del control del motor asíncrono I: (relación v/f cte.) I

**MOTOR ASÍNCRONO
ALIMENTADO A FRECUENCIA
VARIABLE CON FLUJO
CONSTANTE** (Se mantiene la
relación $E/f \approx V/f = \text{cte}$)

MANTENIENDO LA RELACIÓN $V/f=K$
SE MANTIENE CONSTANTE EL
FLUJO Y POR TANTO LA CARGA
MAGNÉTICA

LOS PARES MÁXIMOS SON
IDÉNTICOS A LAS DISTINTAS
FRECUENCIAS DE ALIMENTACIÓN Y
LAS CURVAS PAR-VELOCIDAD SON
PARALELAS

EL MOTOR NO SUFRE SATURACIÓN
Y ES POSIBLE ACCIONARLO EN UN
AMPLIO RANGO DE f



Fundamentos del control del motor asíncrono I: (relación v/f cte.) II

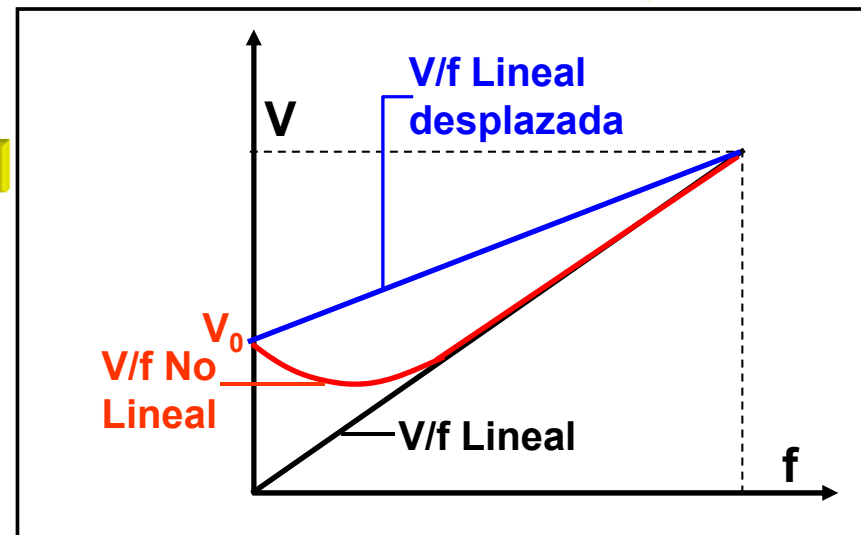
A Bajas frecuencias la caída de tensión interna de la máquina ya no es despreciable $V \neq E$ y por tanto el flujo no se mantiene cte.

Es necesario subir la tensión para que se mantenga el flujo y con él el par

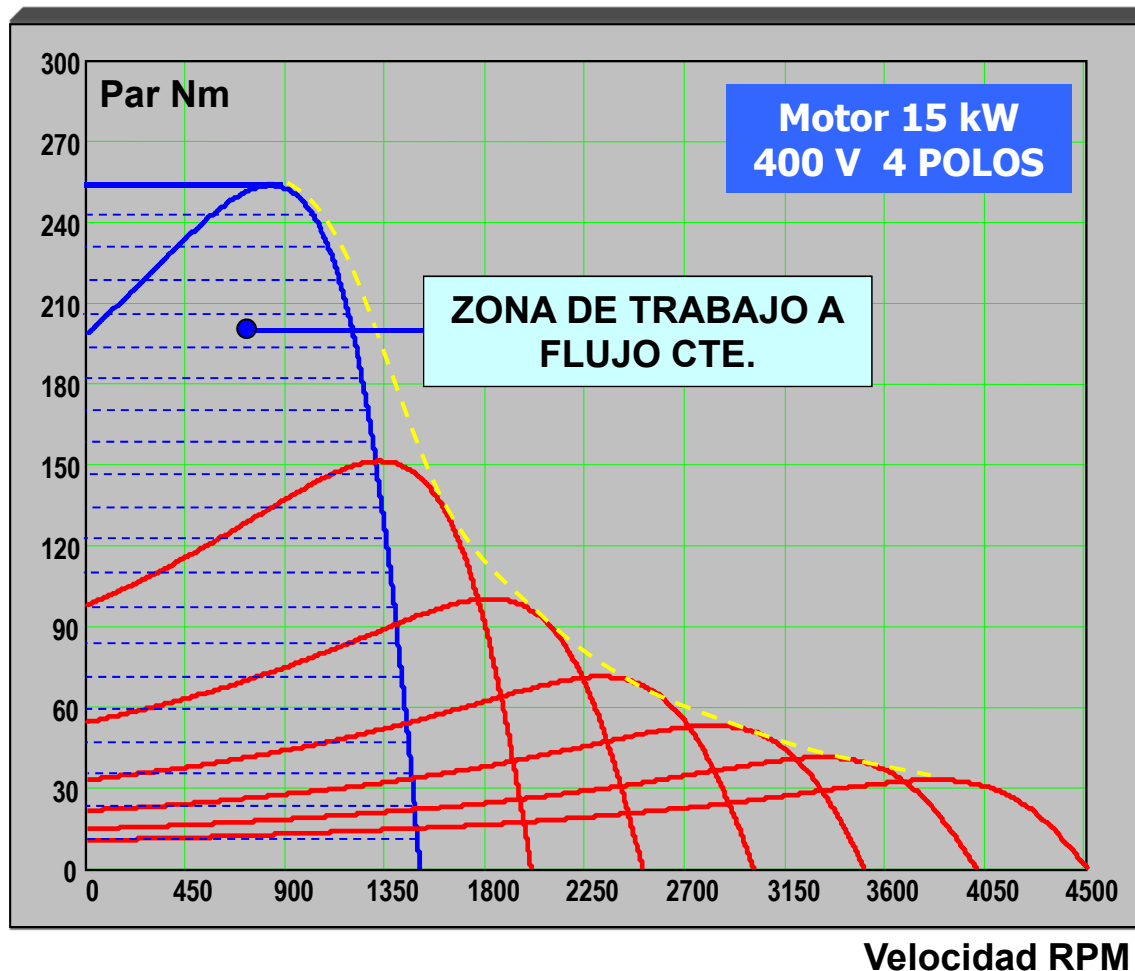
A bajas frecuencias es necesario subir la tensión

El sistema de control incorpora en su programación la curva correspondiente a la relación v/f necesaria para mantener el flujo

Puede utilizarse una relación no lineal (modernos microprocesadores) o una relación lineal desplazada $V = V_0 + Kf$



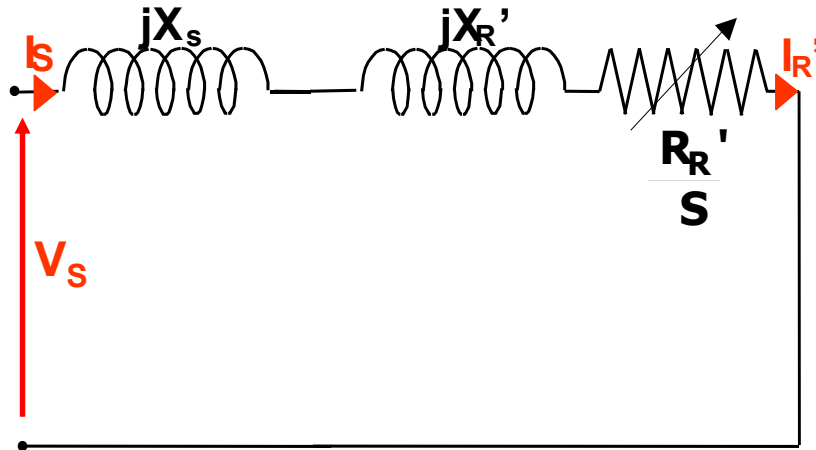
Fundamentos del control del motor asíncrono II: V cte y f variable I



MOTOR ALIMENTADO A
TENSIÓN CONSTANTE
AUMENTANDO LA
FRECUENCIA POR ENCIMA
DE LA FRECUENCIA
NOMINAL

TRABAJANDO A ALTA
FRECUENCIA CON
DEBILITAMIENTO DE CAMPO
(FLUJO MUY INFERIOR AL
NOMINAL) PUEDE, AL SER MUY
ELEVADA, ELIMINARSE LA
REACTANCIA MAGNETIZANTE.
ADEMÁS, LA RESISTENCIA
ESTATÓRICA ES BAJA EN
COMPARACIÓN CON LA
REACTANCIA. POR TANTO,
PUEDE TAMBIÉN ELIMINARSE
DEL CIRCUITO EQUIVALENTE
PARA EL CÁLCULO DEL PAR

Fundamentos del control del motor asíncrono II: V cte y f variable II



$$I_{R'} = \frac{V_s}{\sqrt{\left[\frac{R_R'}{s}\right]^2 + [X_s + X_R']^2}}$$

$$T_i = 3 \cdot \frac{R_R' \cdot P}{s \cdot \omega_1} \cdot I_{R'}^2$$

SE OBTIENE EL
VALOR DE S (W_R)
PARA EL CUAL SE
TIENE EL PAR
MÁXIMO

$$0 = \frac{dT}{ds}$$

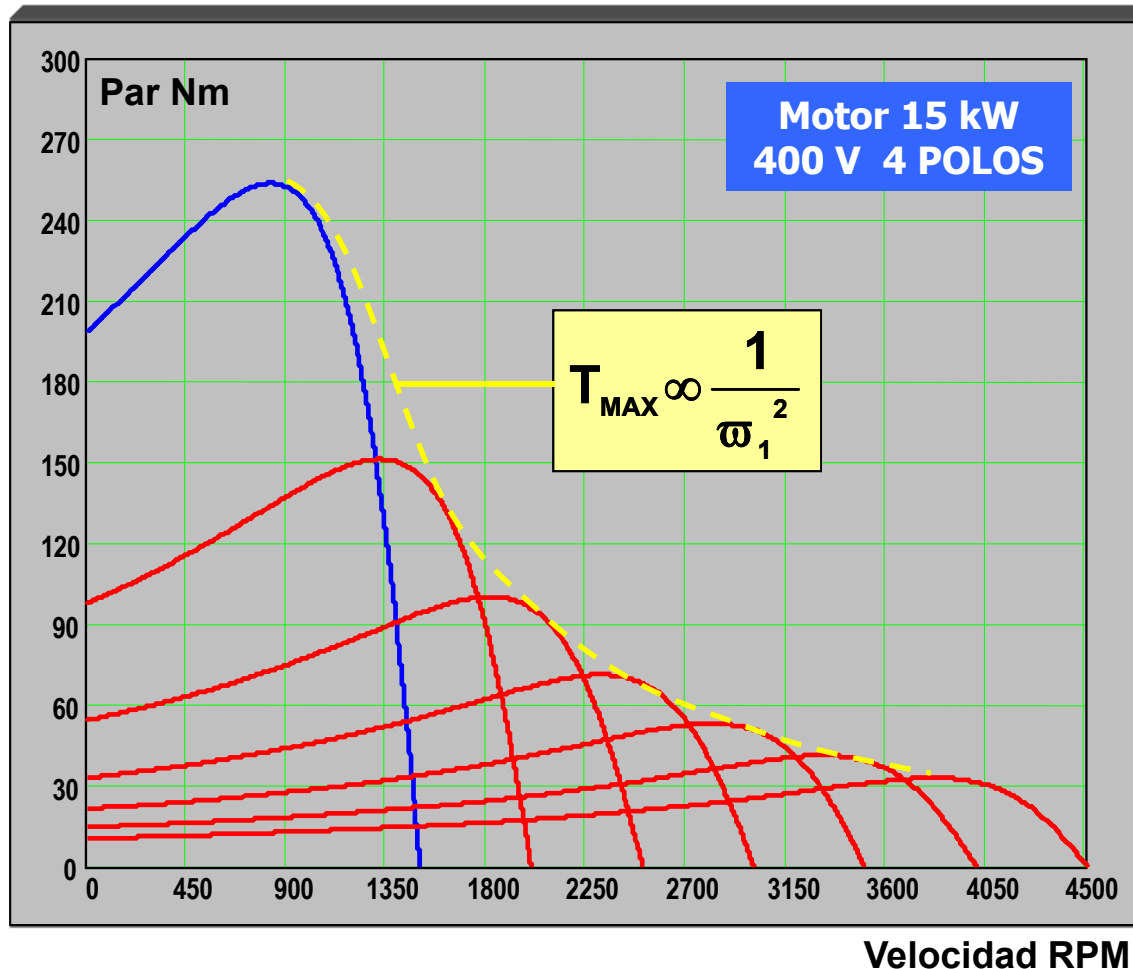
$$T_i = 3 \cdot \frac{R_R' \cdot P}{s \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_s^2}{\left[\left[\frac{R_R'}{s}\right]^2 + [X_s + X_R']^2\right]}$$

$$-\frac{R_R'}{s^2} \left[\left(\frac{R_R'}{s} \right)^2 + (X_s + X_R')^2 \right] + 2 \frac{R_R'}{s^2} \left(\frac{R_R'}{s} \right)^2 = 0$$

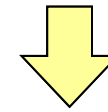
DERIVANDO RESPECTO A S E IGUALANDO
A 0 SE OBTIENE EL DESLIZAMIENTO (S)
CORRESPONDIENTE AL PAR MÁXIMO

$$s_{MAX} = \pm \frac{R_R'}{X_s + X_R'} \quad 50$$

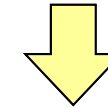
Fundamentos del control del motor asíncrono II: V cte y f variable III



$$S_{MAX} = \pm \frac{R_R'}{X_S + X_R'}$$

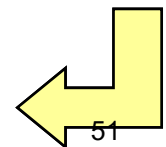


**SUBSTITUYENDO EN LA
ECUACIÓN DEL PAR SE
OBTIENE EL VALOR DEL PAR
MÁXIMO EN TODO EL RANGO**

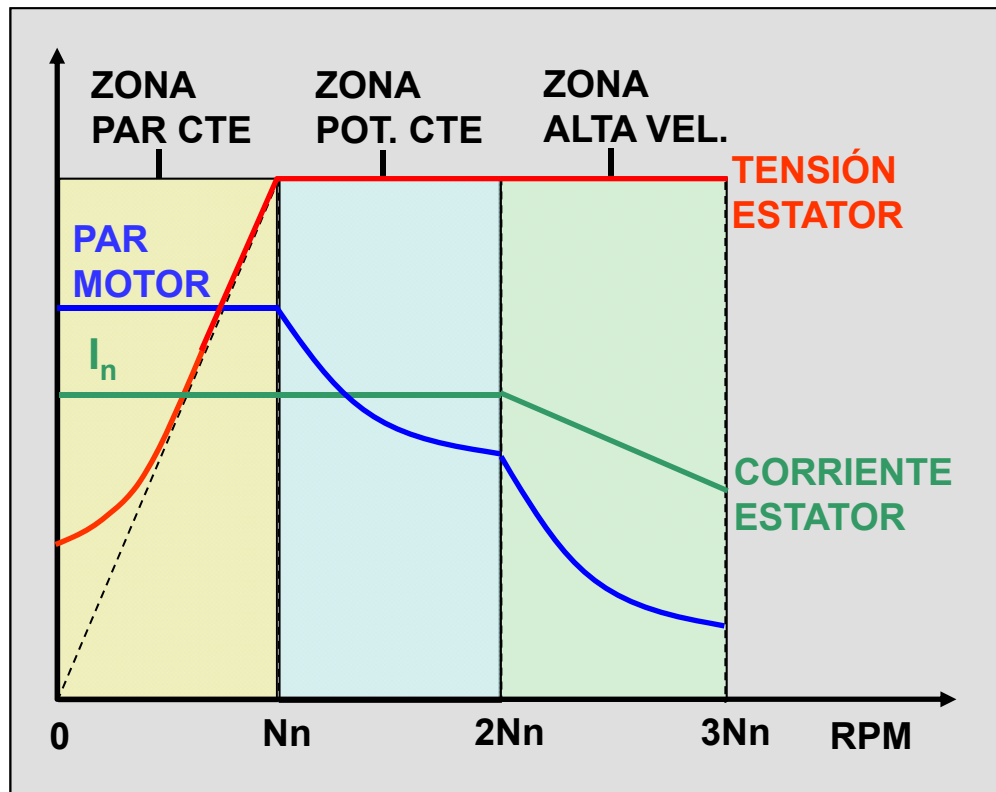


$$T_{MAX} = 3 \cdot \frac{V_S^2}{\omega_1^2} \cdot \frac{P}{2[L_S + L_R']}$$

$$T_{MAX} \propto \frac{1}{\omega_1^2}$$



Zonas de trabajo en el control del motor asíncrono



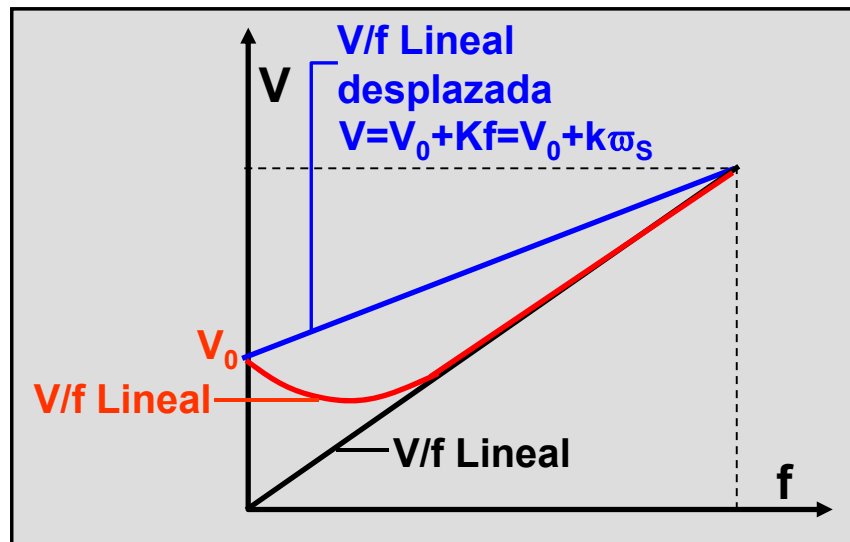
PAR, TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD EN TODO EL RANGO DE USO DE UN MOTOR ASÍNCRONO CON CONTROL DE VELOCIDAD

EN LA ZONA DE PAR CONSTANTE SE TRABAJA A FLUJO CONSTANTE Y CON LA CORRIENTE NOMINAL

EN LA ZONA DE POTENCIA CONSTANTE SE MANTIENEN LA TENSIÓN Y CORRIENTES NOMINALES. EL SISTEMA DE CONTROL GOBIERNA LA FRECUENCIA AUMENTÁNDOLA DE FORMA QUE EL PAR MOTOR ES INVERSAMENTE PROPORCIONAL A LA VELOCIDAD

EN LA ZONA DE ALTA VELOCIDAD SE MANTIENE LA TENSIÓN NOMINAL DEL ESTATOR Y SE CONTINÚA AUMENTANDO LA FRECUENCIA. EL PAR CAE CUADRÁTICAMENTE CON LA FRECUENCIA Y LA CORRIENTE DEL ESTATOR DISMINUYE

Control en bucle cerrado del motor asíncrono a flujo constante I



CONTROL A FLUJO CONSTANTE CON RELACIÓN TENSIÓN/FRECUENCIA PROGRAMADA O AJUSTABLE EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE ESTATÓRICA

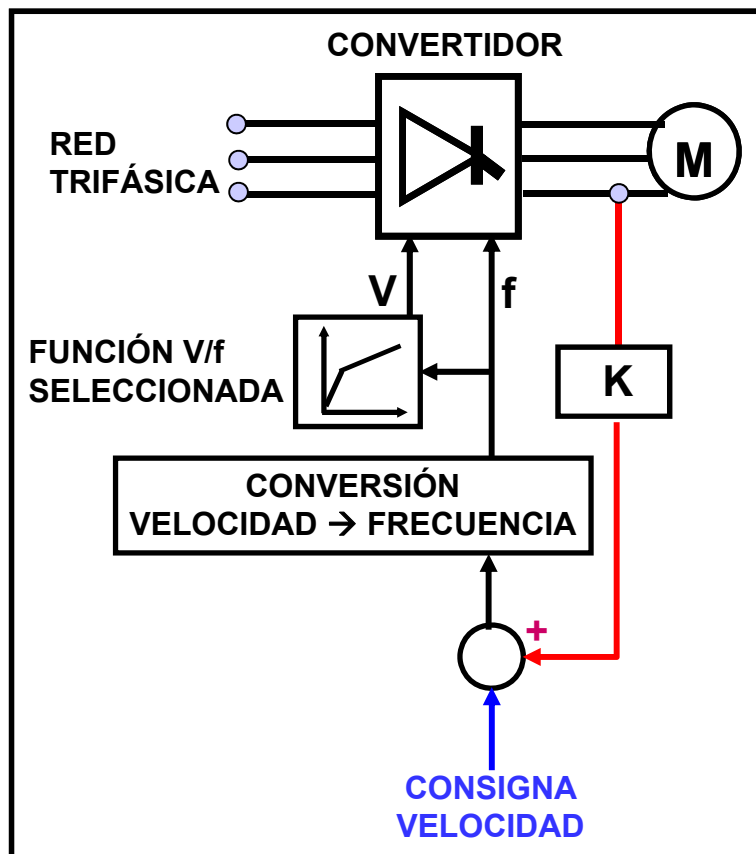
EL SISTEMA DE CONTROL INCORPORA PROGRAMADAS VARIAS RELACIONES V/f QUE PUEDEN SER LINEALES, ESCALONADAS O POLINÓMICAS. EL USUARIO TAMBIÉN PUEDE INTRODUCIR EL PATRÓN QUE DESEE

LA CAÍDA DE TENSIÓN EN LA RESISTENCIA DEL ESTATOR SERÁ VARIABLE EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE CONSUMIDA POR LA MÁQUINA Y ÉSTA DEPENDE DEL TIPO CARGA

LA CURVA V/f QUE SE SELECCIONE ESTARÁ RELACIONADA CON LA EVOLUCIÓN QUE EXPERIMENTE LA CORRIENTE DE LA MÁQUINA Y, POR TANTO, CON LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA MECÁNICA ARRASTRADA POR EL MOTOR

Control en bucle cerrado del motor asíncrono a flujo constante IV

CONTROL A FLUJO CTE SIN REALIMENTACIÓN DE VELOCIDAD Y COMPENSACIÓN DEL DESLIZAMIENTO



EL CONTROL A FLUJO CTE. (RELACIÓN V/f PREFIJADA) PUEDE HACERSE CON O SIN REALIMENTACIÓN DE VELOCIDAD

CUANDO SE REALIZA SIN REALIMENTACIÓN DE VELOCIDAD EL CONVERTIDOR EFECTÚA LA MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DEL MOTOR

LA CONSIGNA DE VELOCIDAD SE CONVIERTE EN FRECUENCIA DE LA MODULADORA (Inversores PWM) O FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN EN INVERSORES DE OTRAS CARACTERÍSTICAS (VSI "Six step")

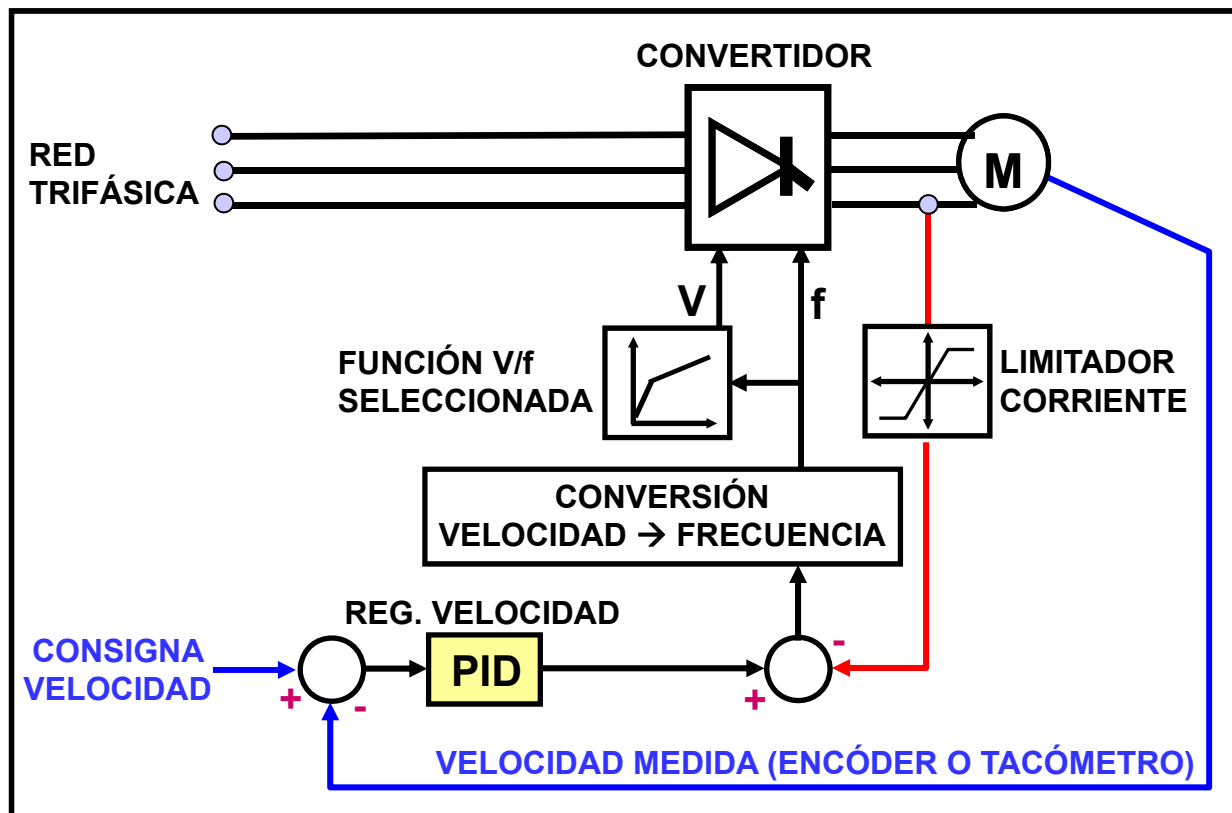
A PARTIR DE LA FRECUENCIA Y DE LA FUNCIÓN V/f SELECCIONADA SE DETERMINA LA TENSIÓN DE SALIDA DEL CONVERTIDOR (Amplitud de la moduladora en PWM, bus de CC en VSI "Six Step")

PARA COMPENSAR EL EFECTO DE FRENADO PRODUCIDO POR LA CARGA SE INTRODUCE UN INCREMENTO EN LA VELOCIDAD PROPORCIONAL A LA CORRIENTE DE ENTRADA AL MOTOR

Control en bucle cerrado del motor asíncrono a flujo constante IV

CONTROL A FLUJO CTE CON
REALIMENTACIÓN DE
VELOCIDAD Y LIMITACIÓN DE
CORRIENTE

EN ESTE CASO EL CONTROL SE REALIZA CON
REALIMENTACIÓN DE LA VELOCIDAD A TRAVÉS DE UN
ENCÓDER, TACÓMETRO ÓPTICO O DINAMO
TACOMÉTRICA



EL REGULADOR PID
CONTROLA LA VELOCIDAD.
SU SALIDA SE VE AFECTADA
POR EL LIMITADOR DE
CORRIENTE CUANDO LA
CORRIENTE SOBREPASA UN
CIERTO LÍMITE. EN ESE
CASO REDUCE LA SALIDA
DEL REGULADOR PARA
BAJAR LA RELACIÓN V/f

EN EL PROCESO DE
ARRANQUE LA CORRIENTE
TAMBIÉN PERMANECE
LIMITADA

CONTROL DEL MOTOR ASÍNCRONO. CARACTERÍSTICAS

- Motor de inducción presenta mejores prestaciones que el de CC

VENTAJAS

- Robustez
- Sencillez
- Bajo coste
- Escaso mantenimiento

INCONVENIENTES

- El control del motor de inducción es más complejo que el de cc.

El flujo y el par están acoplados

La variación de la frecuencia de la tensión de alimentación permite regular la velocidad del motor, pero también provoca una variación indeseada del flujo y del par en el motor, debido al fuerte acoplamiento de las variables

CONTROL DEL MOTOR ASÍNCRONO. CARACTERÍSTICAS

- Alternativas de control del motor de inducción

- Control Escalar
- Control Vectorial

- **CONTROL ESCALAR**

- El control escalar ($V/f=cte$) tiene en cuenta dicho acoplamiento e intenta mantener el flujo constante, para poder suministrar el par máximo a cualquier velocidad.

- **INCONVENIENTE**

Ofrece una respuesta dinámica lenta y poco precisa

- **APLICACIONES**

- En aquellos casos en los cuales las exigencias de control no sean muy estrictas



CONTROL DEL MOTOR ASÍNCRONO. CARACTERÍSTICAS

- **CONTROL VECTORIAL**

- Método de regulación de velocidad sofisticado y moderno. Se denomina también control por orientación de campo (“field oriented control”)
- Permite desacoplar las variables del motor de inducción, por lo que se consigue un control independiente de la velocidad y par

- **VENTAJAS**

- Se consigue mejor respuesta dinámica y precisión que con el control escalar

- **EXIGENCIAS**

- Disponer de un buen modelo del motor a controlar
- Disponer de suficiente potencia de computación para la realización, en tiempo real, de la gran cantidad de operaciones asociadas a cada muestra



CONTROL DEL MOTOR ASÍNCRONO. CARACTERÍSTICAS

- **CONTROL VECTORIAL**
- **INCONVENIENTES**
 1. Para evitar imprecisiones, es necesario conocer con exactitud el valor de algunos parámetros del motor para el cálculo de los valores deseados de las variables internas. El problema surge si alguno de los parámetros, por ejemplo la resistencia del rotor, no se pueda medir y se tenga que estimar.

- **CONTROL VECTORIAL**
- **INCONVENIENTES**
 - 2. La gran cantidad de operaciones matemáticas que se deben realizar por muestra. Se precisa disponer de sistemas de control digital (DSP) con gran potencia computacional y recursos propios de microcontroladores de gama alta (convertidores A/D y D/A, E/S digitales, temporizadores, unidades de captura y comparación, etc) que **permitan la implementación, en tiempo real**, de complejos algoritmos de control.

Variadores de velocidad comerciales

