



EL42C

CONVERSIÓN ELECTROMECHANICA DE LA ENERGÍA

VIII. CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS



8.1 INTRODUCCIÓN

- Comúnmente se usan controles en la velocidad, torque, en la partida, conversores, etc.
- También en la supervisión del desempeño de la máquina, para detectar fatigas, indicios de fallas, etc.
- La eficiencia y funcionamiento de las máquinas se deben en parte a las metodologías de control asociadas.
- Las máquinas requieren de controles precisos y rápidos.
- La tecnología actual se basa en la electrónica de potencia.



8.2 INTERRUPTORES

□ INTERRUPTORES

- 1902: tubos al vacío para altos voltajes y corrientes pequeñas, y tubos de descarga para corrientes altas.
- 1914: interruptores controlables.

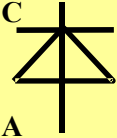
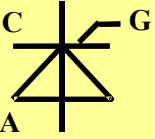
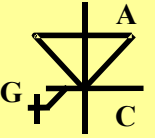
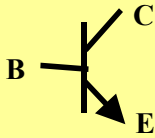
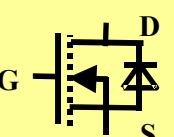
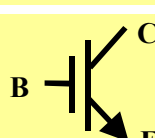
El desarrollo posterior es el siguiente:

AÑO	VÁLVULA
1947	Transistor.
1954	Diodo de silicio.
1957	Tiristor (SCR).
1961	Tiristor con capacidad de apagado (GTO).
1976	Mosfet.
1982	IGBT.



8.2 INTERRUPTORES

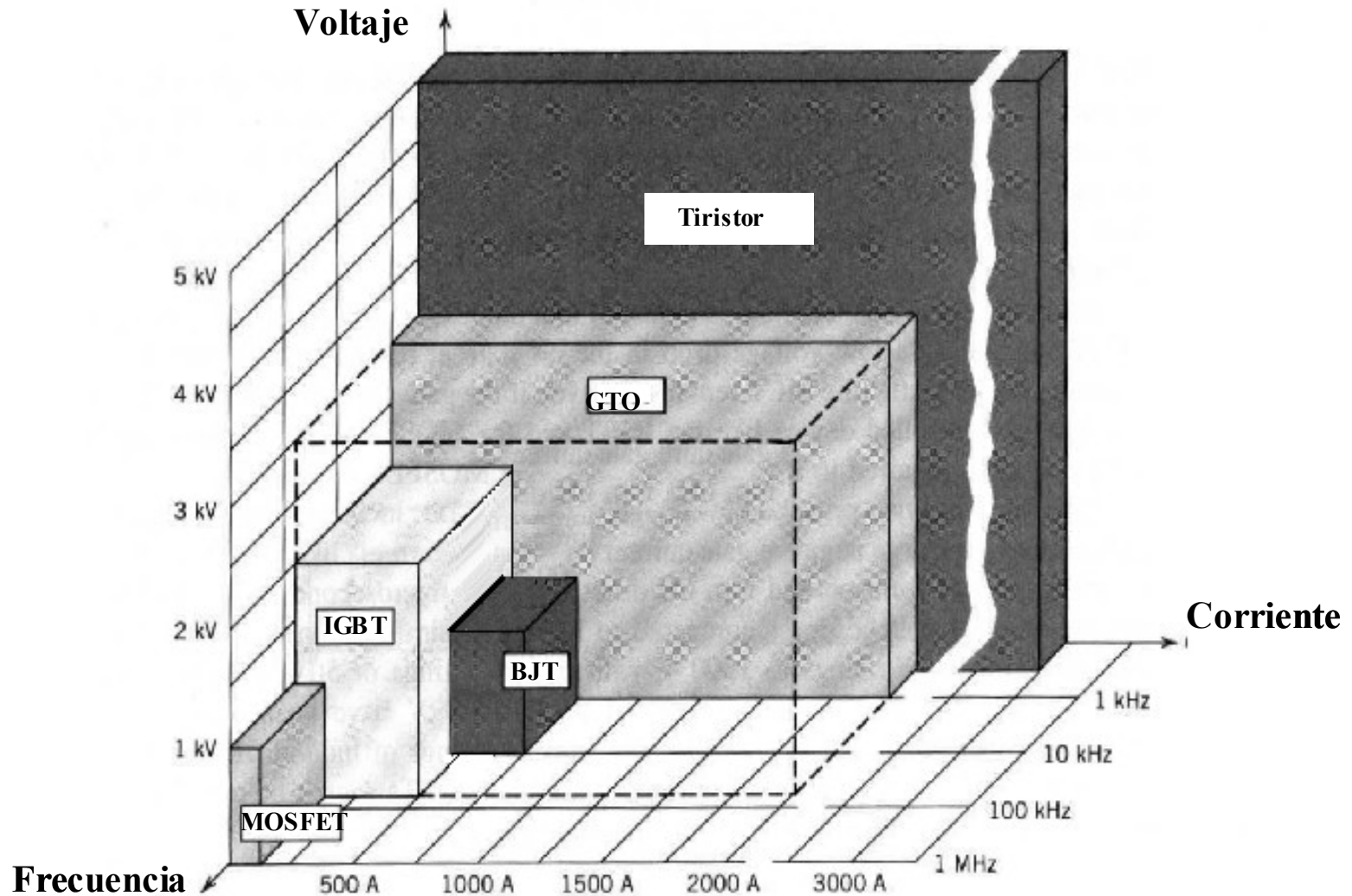
Características de las válvulas de electrónica de potencia:

Símbolo	Límites de Operación	Caída de Voltaje	Costo	Controlabilidad
 Diodo	50V/100A (Schottky) 30kV/0,5A o 500V/10kA (Si.)	0,3 V (Schottky) 2V (Si.)	Bajo	-----
 SCR Tiristor	$U_{AC}=8000V$ $I_A=6000A$	2 .. 3 V	Medio	Ángulo de Encendido
 GTO Gate Turn Off Thyristor	$U_{AC}=6000V$ $I_A=6000A$	3 ..4 V	Muy Elevado	Ángulo de Encendido y Apagado
 Transistor Bipolar	$U_{CE}=1200V$ $I_C=300A$	1 .. 2 V	Elevado	Ángulo de Encendido y Apagado
 MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	$U_{DS}=1000V$, $I_D=15A$ / $U_{DS}=50V$, $I_D=250A$	< 1 .. 10 V (~1% de $U_{DS,max}$)	Bajo	Ángulo de Encendido y Apagado
 IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor	$U_{CE}=3000V$ $I_C=3000A$	2 .. 4 V	Medio	Ángulo de Encendido y Apagado



8.2 INTERRUPTORES

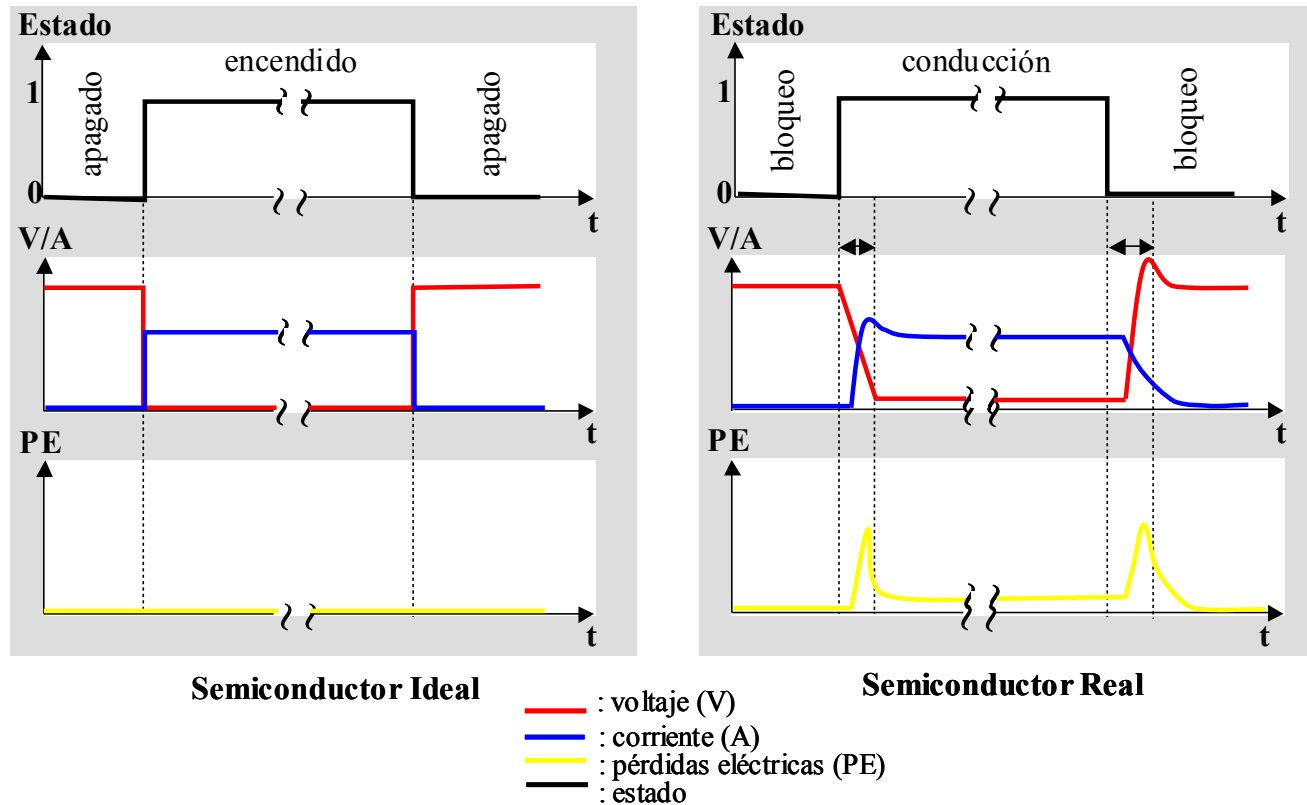
Según los niveles de corriente, de voltaje y de conmutación:





8.2 INTERRUPTORES

Estos dispositivos no se comportan como interruptores ideales:



- Pese a la no linealidad, su utilización práctica es muy extensa
- los convertidores de potencia que controlan el nivel y dirección de la potencia entregada a una carga.



8.3 CONVERSORES DE POTENCIA

□ CONVERSORES DE POTENCIA

A través del encendido y apagado de válvulas convierten una potencia de entrada en una de salida controlada según los requerimientos.

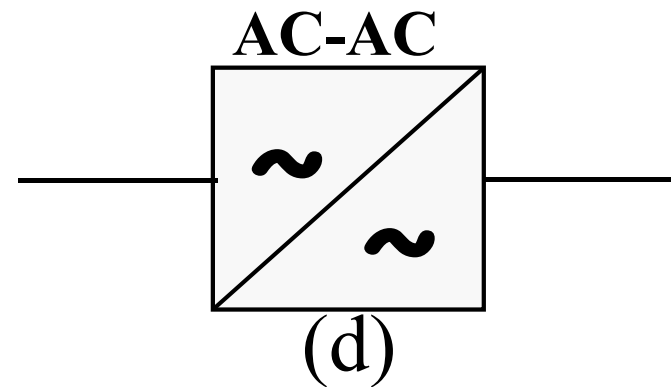
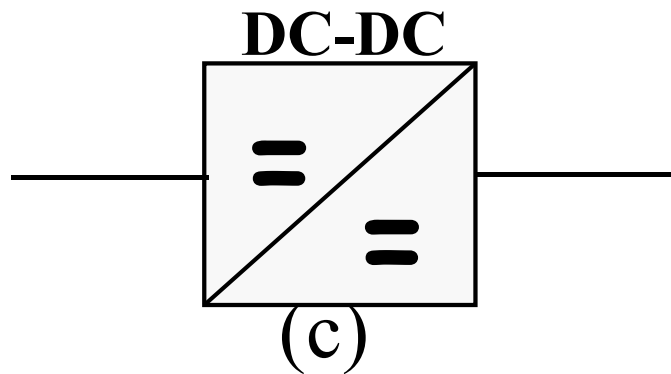
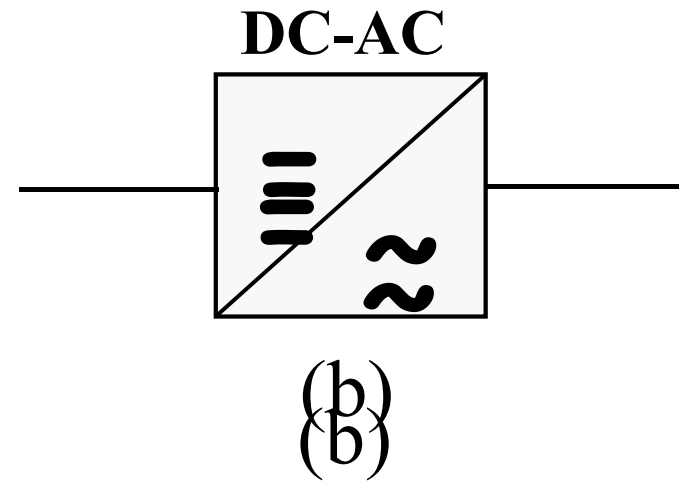
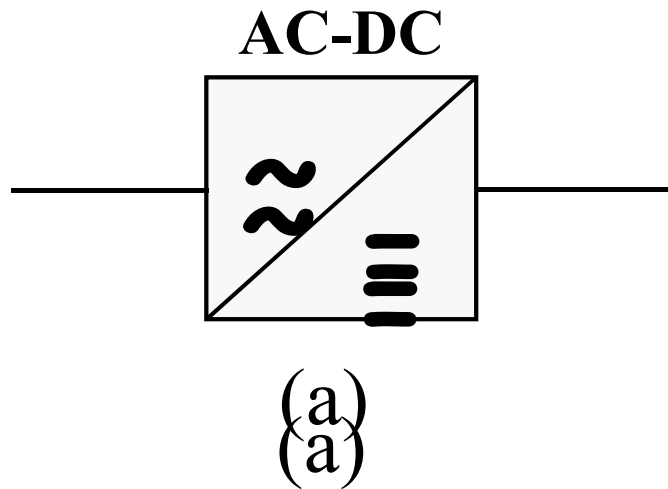
Se clasifican en:

- **Conversores AC-DC:** **Rectificadores** no controlados, semicontrolados y controlados.
- **Conversores DC-AC:** **Inversores**
- **Conversores DC-DC:** **Chopper** (tipo Buck, Boost).
- **Conversores AC-AC:** **Cicloconvertidores**



8.3 CONVERSORES DE POTENCIA

La correspondiente simbología para cada convertidor es:





8.3 CONVERSORES DE POTENCIA

8.3.1 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Según el grado de controlabilidad del conversor, dado por la complejidad del circuito y las válvulas que lo componen, estos se clasifican en:

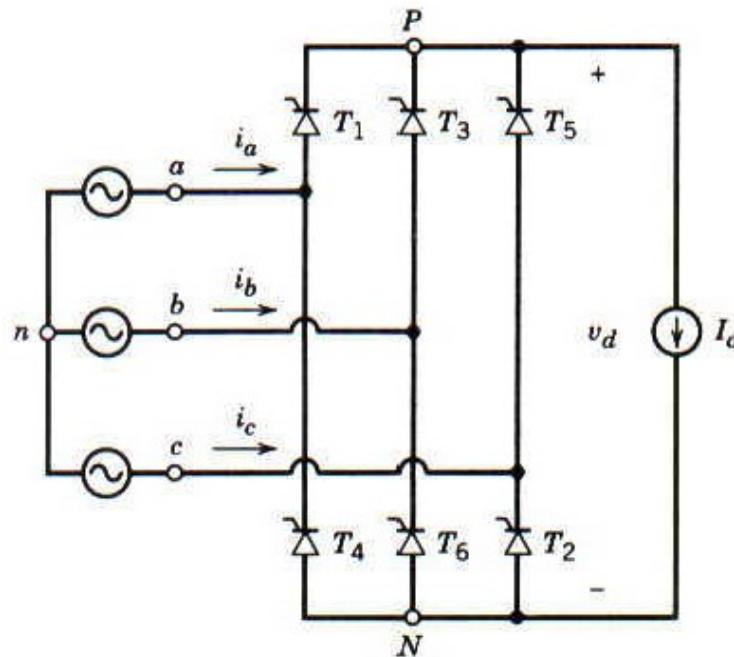
- **Rectificador o puente de media onda:**

- Tres diodos o tiristores, uno por cada fase, conectados entre la fuente y la carga.
- Al usar diodos la tensión de salida no es controlable
- La tensión se puede controlar al usar tiristores.
- Transfieren armónicas al lado de alterna y a la red.



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

- **Rectificador o puente de onda completa o puente de Graetz:**
 - Se usan un par de válvulas por fase, conectados entre la fuente y la carga.
 - La tensión se controla por el ángulo de disparo de los tiristores.
 - Se puede obtener el doble de la tensión DC que la del puente de media onda.





8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

- **Rectificador hexafásico o de seis pulsos:**

- Se usan un transformador con punto medio en los secundarios.
- Los seis interruptores se conectan: cátodos comunes a barra positiva del lado DC, y los ánodos al secundario del transformador.
- El retorno (negativo) se conecta al punto medio del secundario del transformador.
- La tensión es controlada por el disparo de las válvulas y es mayor al puente de media onda y menor que el de onda completa.
- Bajo nivel de rizado (ripple).



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

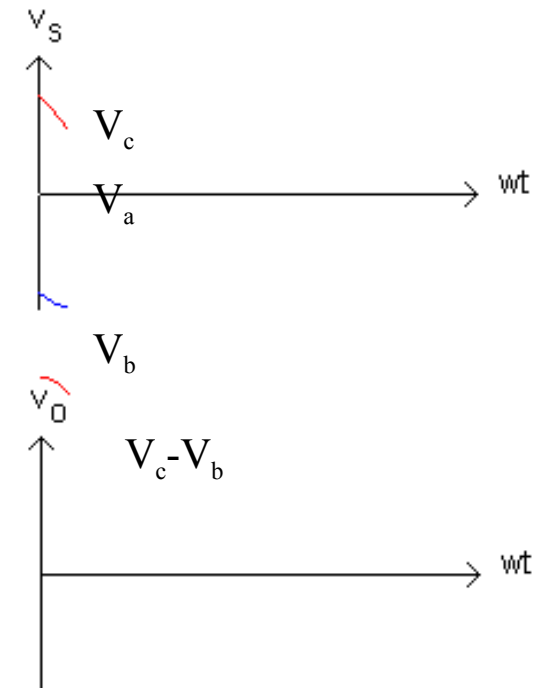
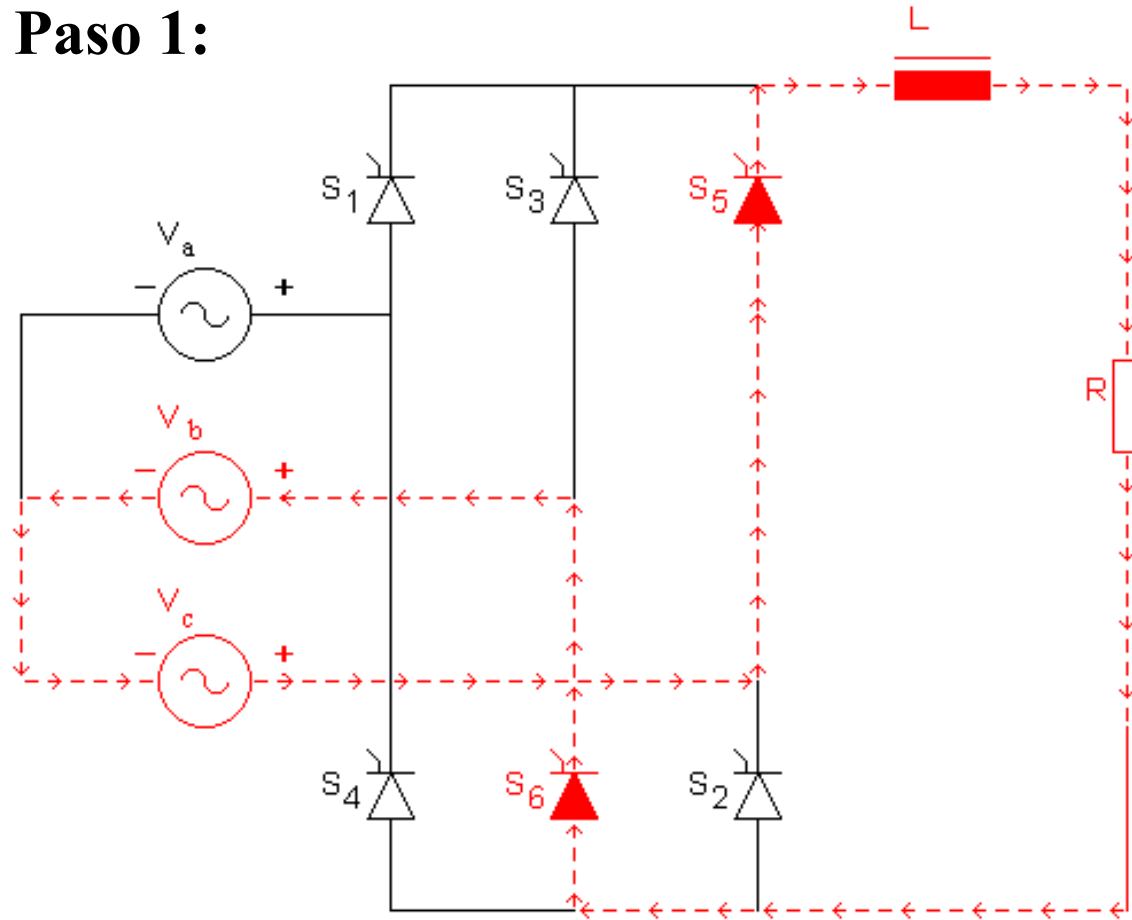
La clasificación de acuerdo a su grado de controlabilidad es:

- **Rectificador no controlado:** usan diodos, lo que no permiten un control en el encendido ni en el apagado.
- **Rectificador semicontrolado:** los interruptores conectados a la barra positiva son controladas (SCR) y los de la barra negativa son diodos.
- **Rectificador controlado:** se tiene control sobre el encendido (SCR) o encendido y apagado (IGBT, GTO, etc.)



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Paso 1:

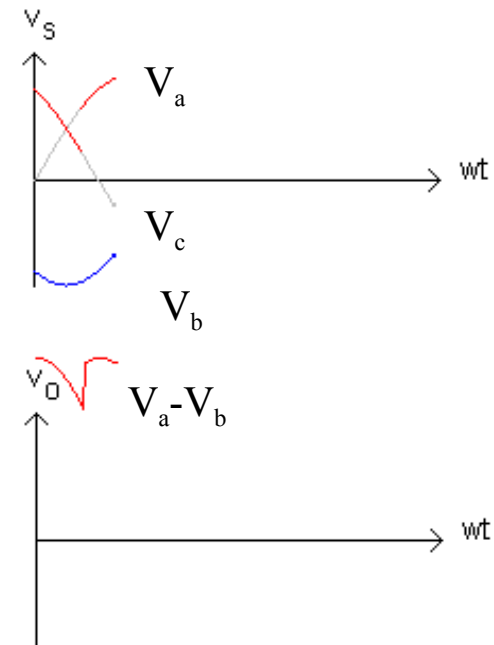
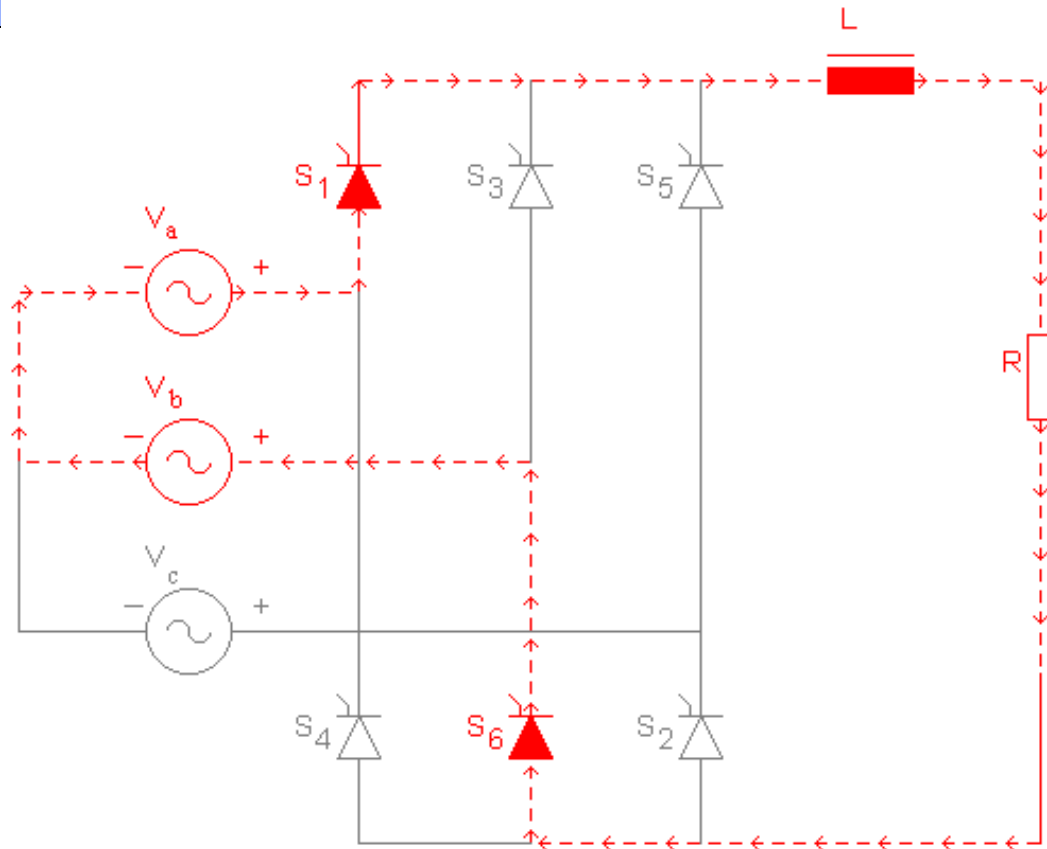


- La tensión más alta corresponde a la fase *c* y la menor a la fase *b*.
- La corriente sale de la fase *c*, pasa por S_5 , alimenta la carga y retorna a la fase *b* por S_6 .



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Paso 2:



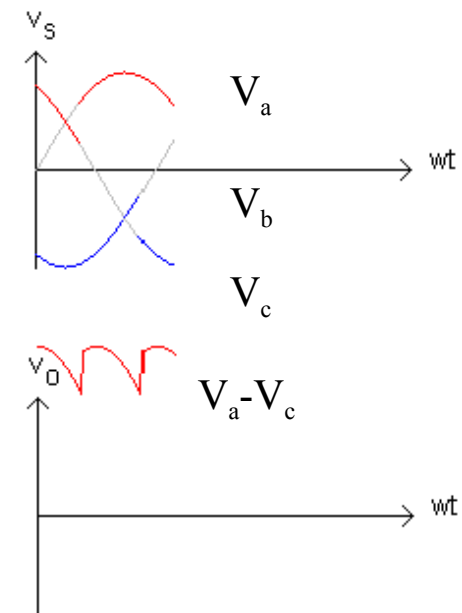
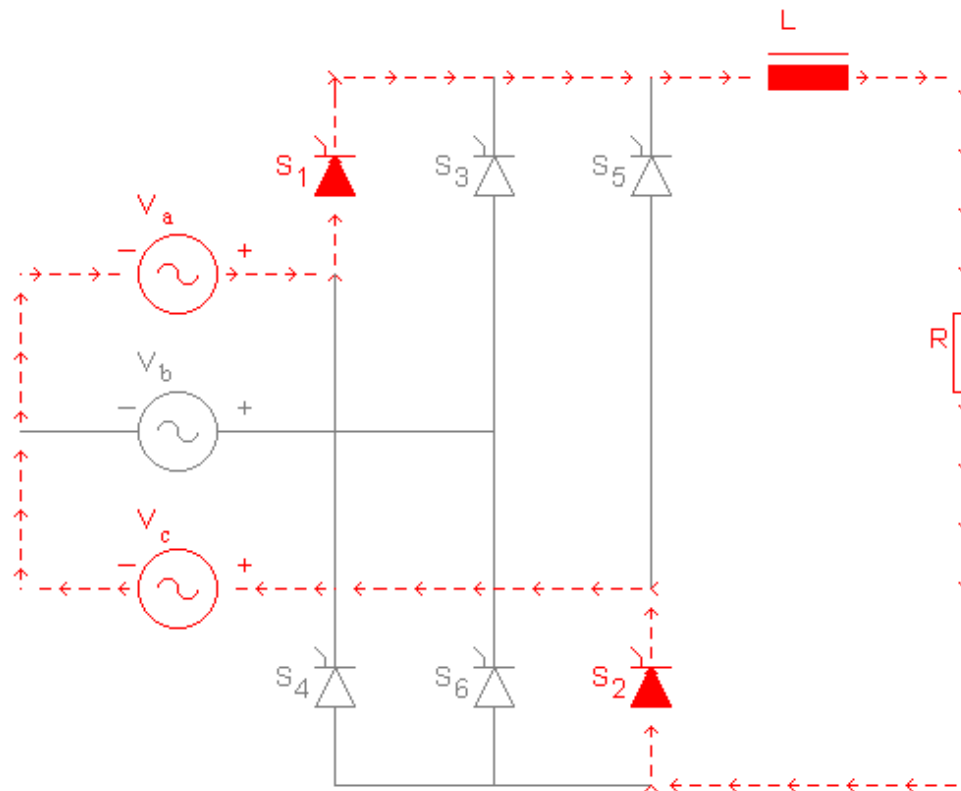
- El ángulo de disparo indica el momento en que la corriente circule por la fase a .
- La tensión más alta corresponde a la fase a y la menor a la fase b .
- La corriente sale de la fase a , pasa por S_1 , alimenta la carga y retorna a la fase b por S_6 .



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Paso 3:

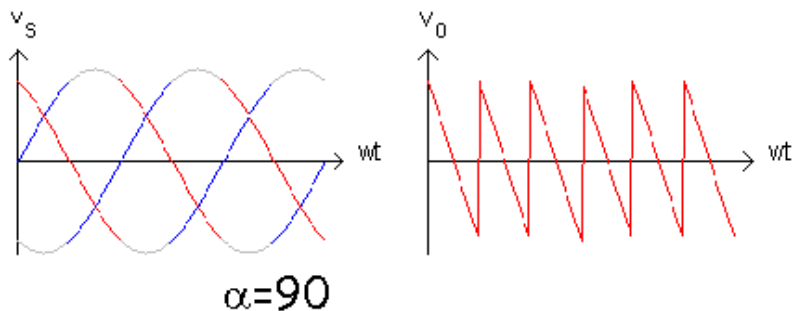
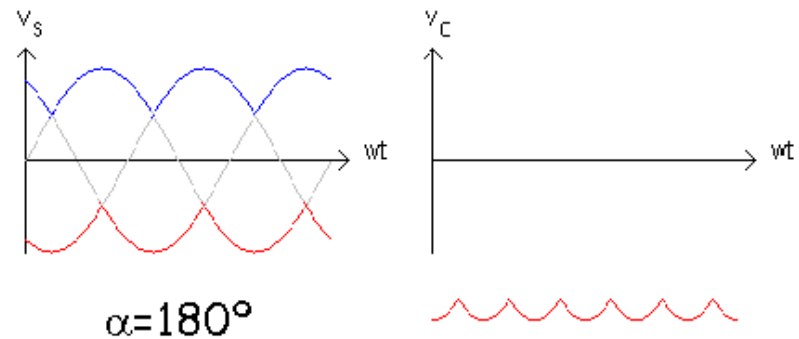
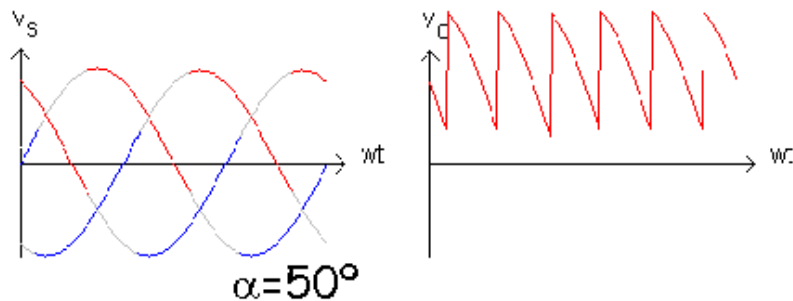
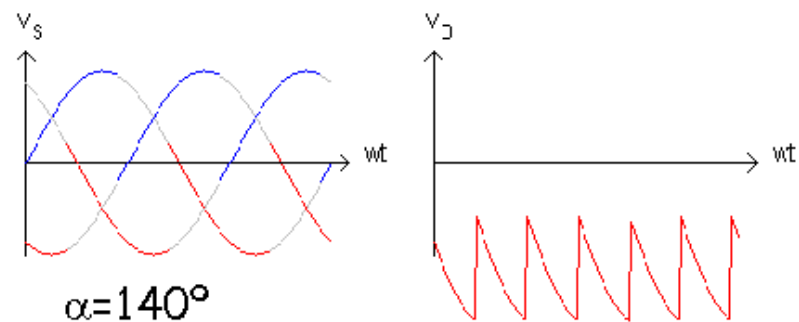
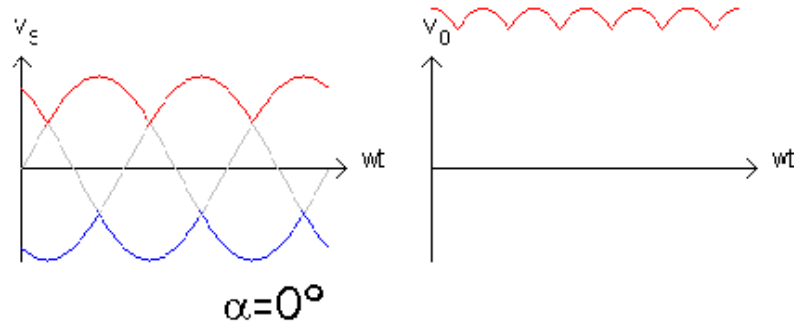
- La corriente sale de la fase a por S_1 , alimenta la carga y retorna por S_2 de la fase c .





8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Las formas de onda y el valor DC de la tensión generada dependen del ángulo de disparo (α):



Ángulo de disparo: α

$0 \leq \alpha \leq 90$: Polaridad positiva

$90 \leq \alpha \leq 180$: Polaridad negativa

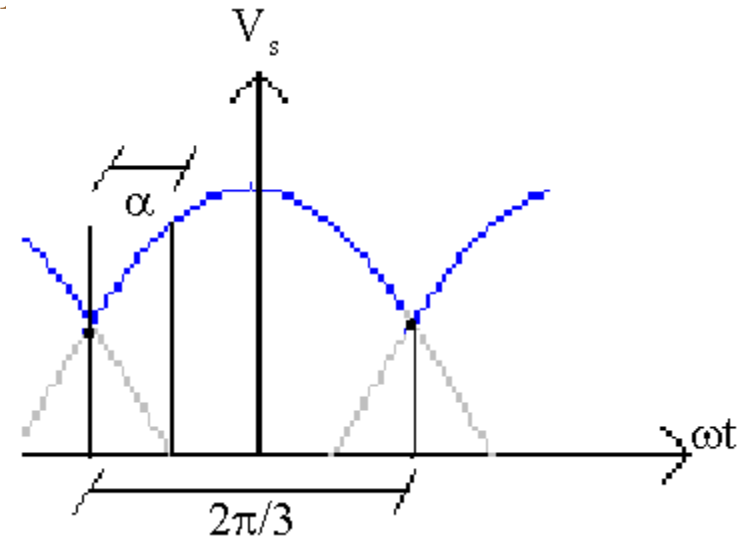


8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

□ CÁLCULO DE LA TENSION GENERADA

$$V_s = \sqrt{2} V_{eff} \cos(\omega t)$$

$$V_{DC} = \frac{2}{2\pi/3} \int_{-\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\alpha} \sqrt{2} V_{eff} \cos(\omega t) d(\omega t)$$



Desarrollando, se obtiene:

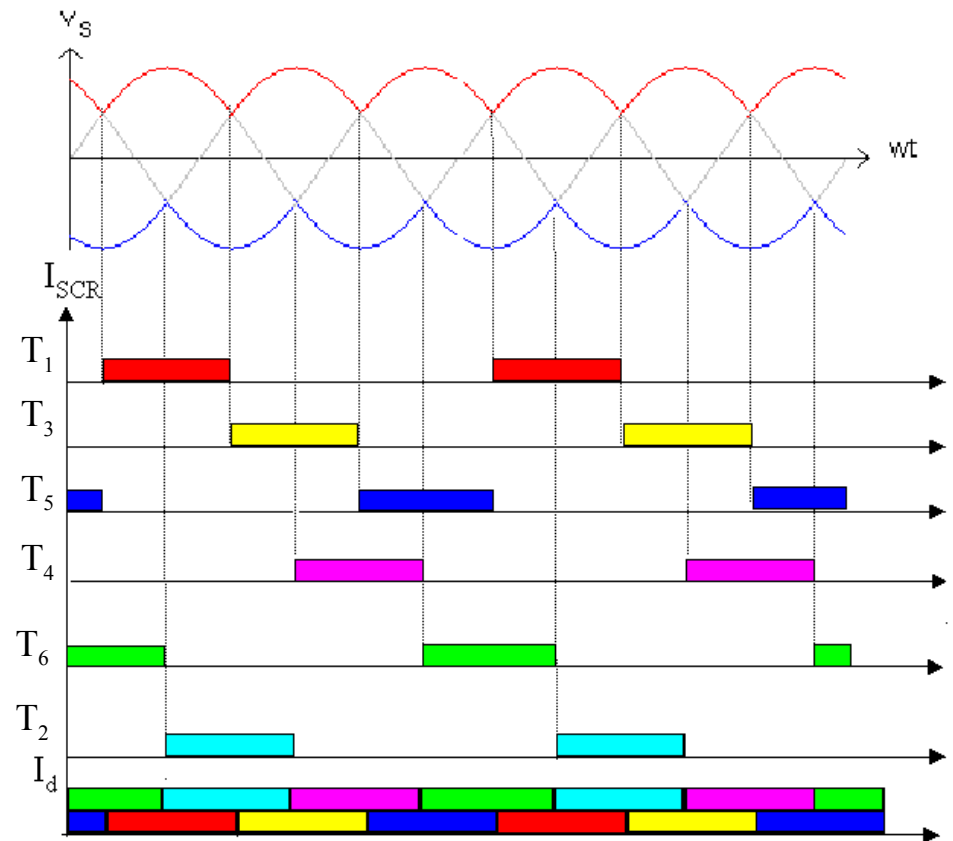
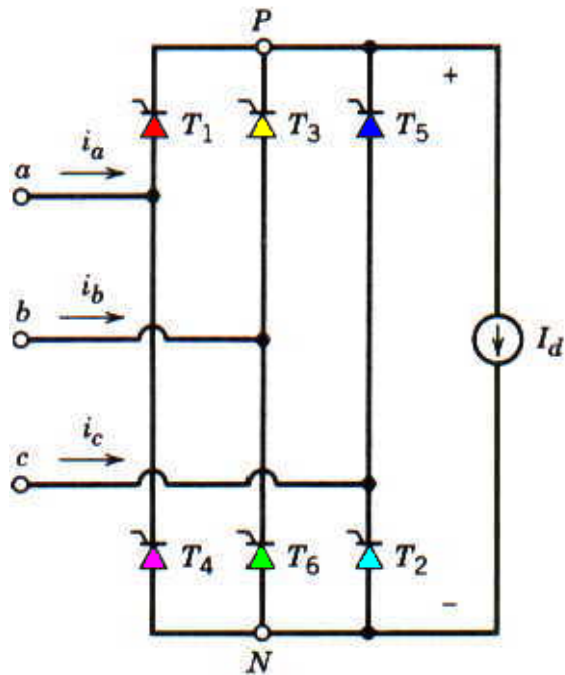
$$V_{DC} = \frac{\sqrt{2} V_{eff}}{\pi/3} \left[\sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) - \sin \left(-\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right] = 2\sqrt{2} V_{eff} \frac{\sin \left(\frac{\pi}{3} \right)}{\pi/3} \cos(\alpha) = 2,34 V_{eff} \cos(\alpha)$$



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

□ CÁLCULO DE LA CORRIENTE GENERADA

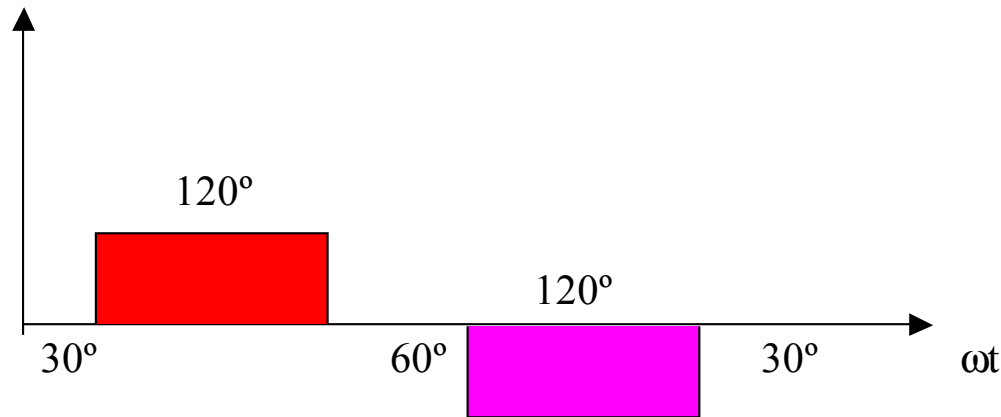
Para $\alpha = 0^\circ$:





8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

La corriente DC por la carga se calcula considerando la corriente por cada fase, para la fase a :



Integrando:

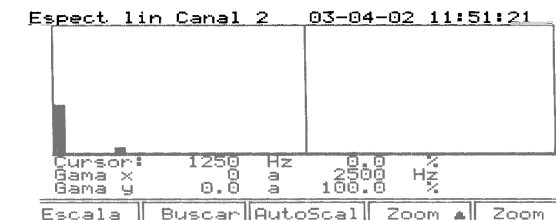
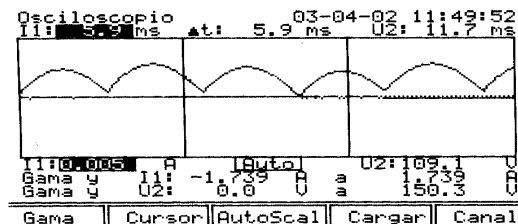
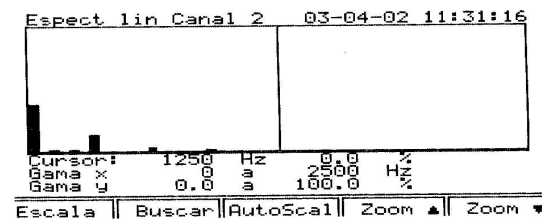
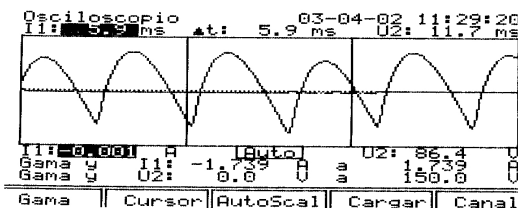
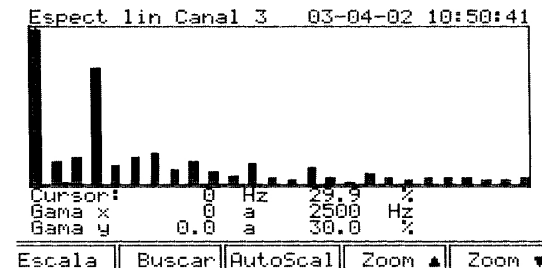
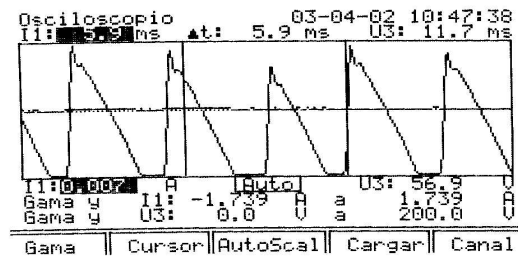
$$\begin{aligned} I_{eff}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/3} I_d^2 dt = \frac{2}{3} I_d^2 \\ &= I_{eff} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \end{aligned}$$



8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Las armónicas introducidas por el rectificador a las corrientes de fase se aminoran colocando una inductancia en serie con la carga (filtro).

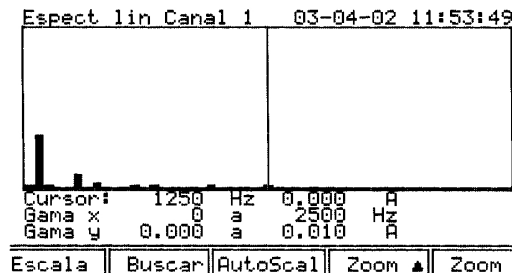
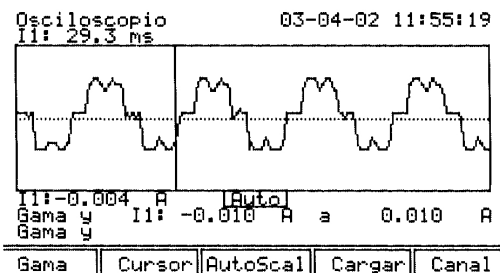
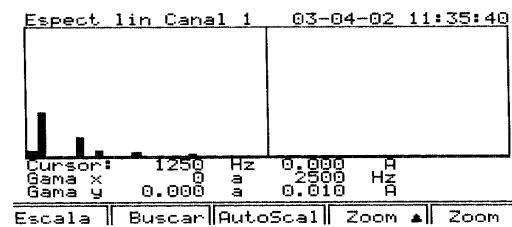
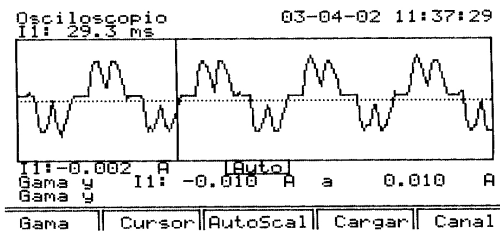
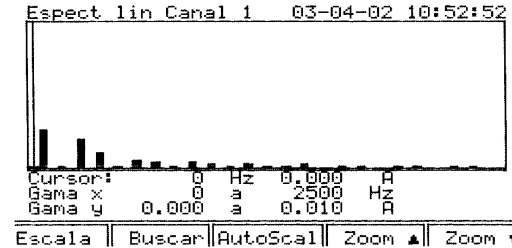
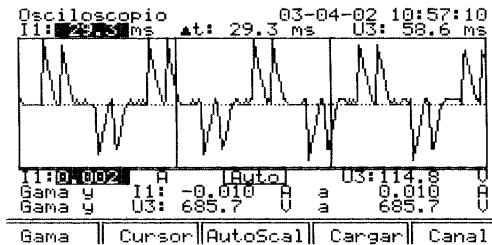
El voltaje generado, su contenido de armónicas y el efecto del filtro inductivo, obtenidos experimentalmente:





8.3 CONVERSIÓN AC-DC: RECTIFICADOR

Para el caso de la corriente en una fase del lado AC:



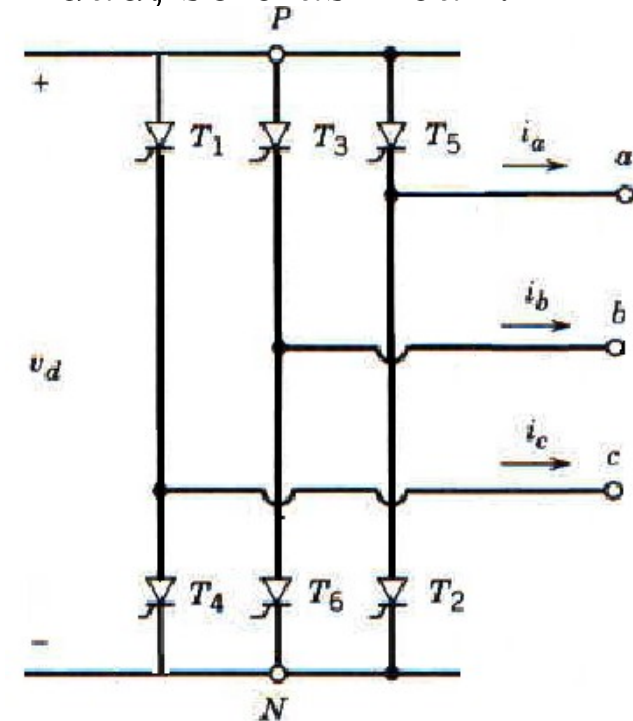


8.4 CONVERSIÓN DC-AC: INVERSOR

De acuerdo al tipo de válvulas y a su controlabilidad, se clasifican:

- **Inversor de conmutación natural:**

- Usan tiristores que permiten controlar el ángulo de disparo.
- No es controlable la fase de las corrientes generadas.
- El factor de potencia es inductivo.



- **Inversor de conmutación forzada:**

- Usan válvulas con control en el encendido y apagado.
- Permiten controlar el factor de potencia y las formas de onda.



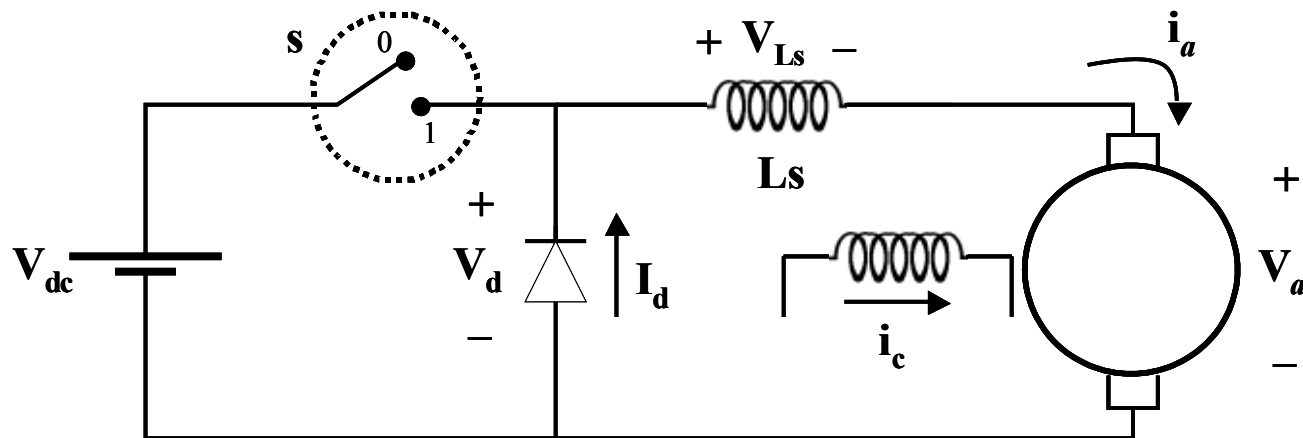
8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

Las dos configuraciones básicas son: conversor DC-DC de bajada y de subida.

❑ CONVERSOR DC-DC DE BAJADA (CHOPPER BUCK).

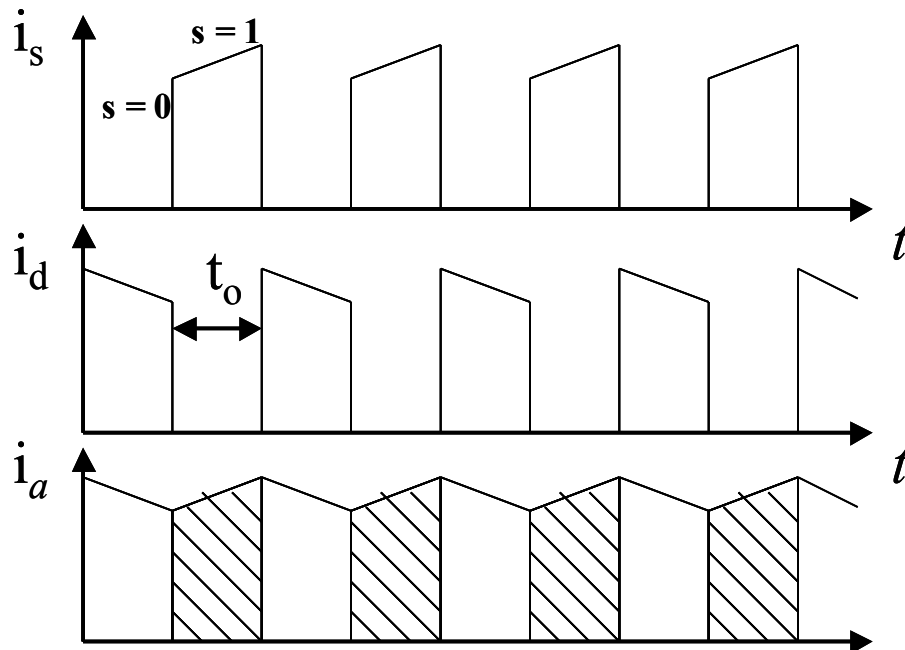
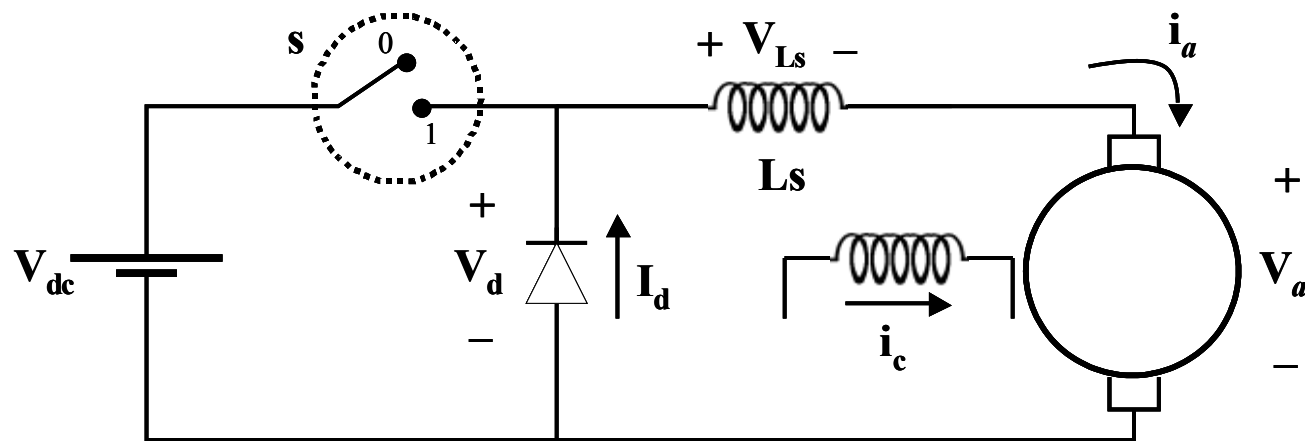
Produce a la salida una tensión DC menor o igual a la de entrada.

El circuito básico sería:





8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER



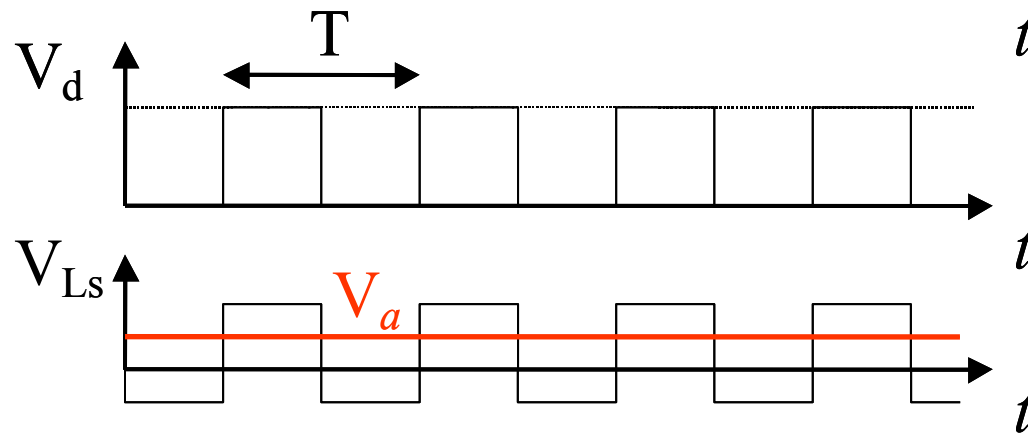
- Cuando $S = 1$, V_{dc} alimenta al motor y L_s almacena energía (pendiente positiva).
- $S = 0$, se descarga L_s a través del diodo (pendiente negativa).
- En la armadura de la máquina circulan dichas corrientes.



8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

La continuidad de la corriente depende del nivel de rizado, mejorando con la rapidez de conmutación de la válvula y el valor de la inductancia.

Los gráficos de voltaje:



Cuando $S = 0$, $V_d = 0$ pues está conduciendo y L_s entrega energía al motor. Cuando $S = 1$, $V_d = V_{dc}$ (no conduce) y L_s almacena energía.



8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

La tensión aplicada de calcula:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} V_{dc} dt = \frac{V_{dc} \cdot t_0}{T} = \delta \cdot V_{dc}$$

con: $\delta = \frac{t_0}{T}$ es el ciclo de trabajo (duty cycle),

y donde V_a es la tensión aplicada, T el periodo de conmutación y t_0 el tiempo de conducción

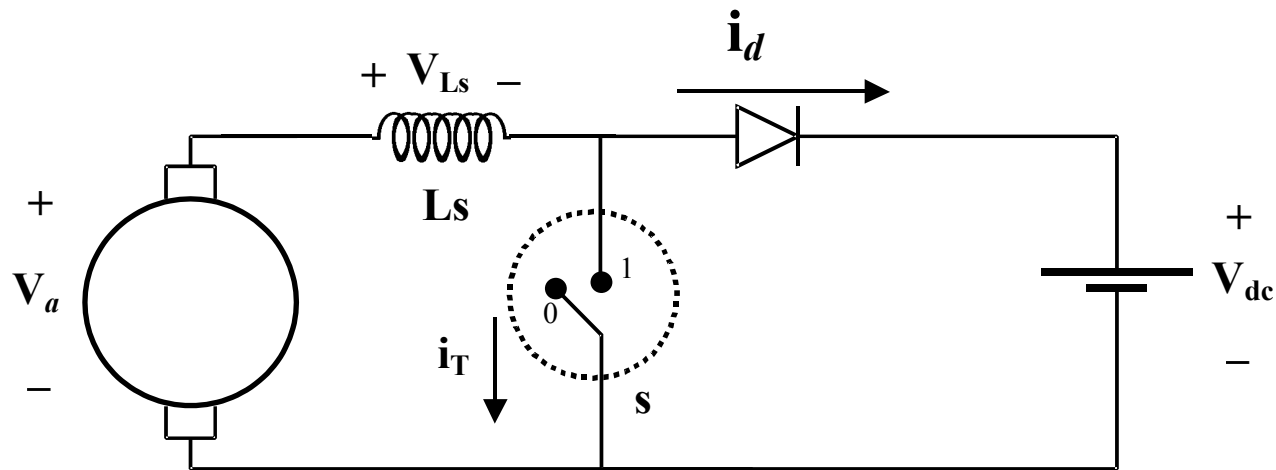


8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

□ CONVERSOR DC-DC DE SUBIDA (CHOPPER BOOST).

Produce a la salida una tensión DC regulada de igual o mayor valor que la de entrada.

El circuito básico sería:

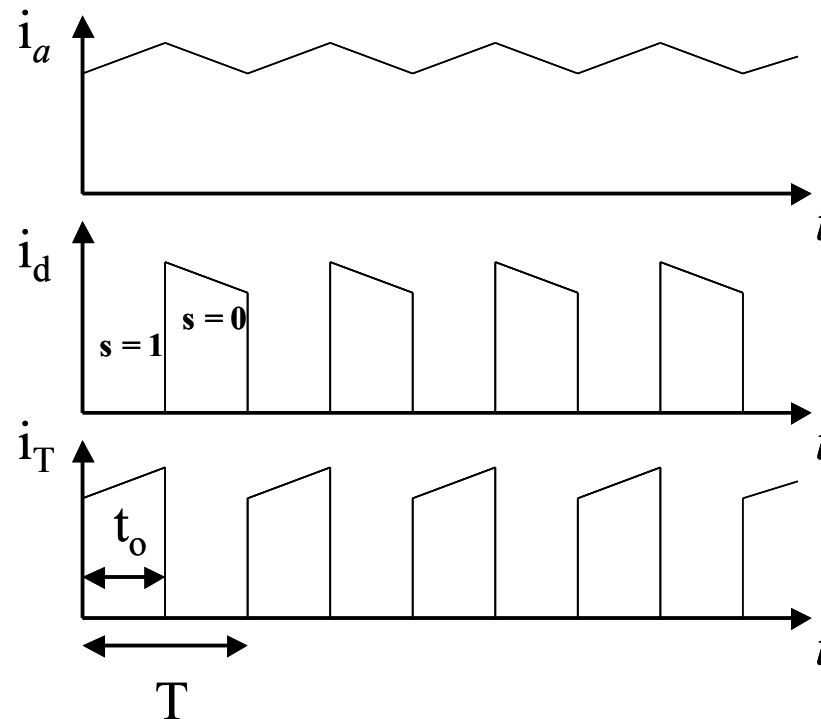


La máquina de CC actúa como generador entregando energía a la fuente (almacenador de energía).



8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

Si $S = 1$, la máquina sólo entrega energía a L_s (pendiente positiva de i_a)



Para $S = 0$, por el diodo circula la energía de la máquina y de la descarga de L_s hacia la fuente (pendiente negativa).

El diodo evita la descarga de la fuente.



8.5 CONVERSIÓN DC-DC: CHOPPER

La carga de la fuente hace que ésta tome un voltaje igual al de la armadura ($S = 0$), luego al encenderse la válvula, la máquina comienza a cargar a L_s .

Al apagarse la válvula, la tensión de la inductancia se suma al de la armadura, alcanzándose un valor mayor al de la fuente. Consecuentemente, el diodo es polarizado de manera de permitir la circulación de corriente.

Considerando que:

$$i_T = \frac{t_0}{T} \cdot i_a = \delta \cdot i_a, \quad i_d = \frac{(T - t_0)}{T} \cdot i_a = (1 - \delta) \cdot i_a$$
$$V_{dc} = \frac{V_a}{1 - \delta}$$

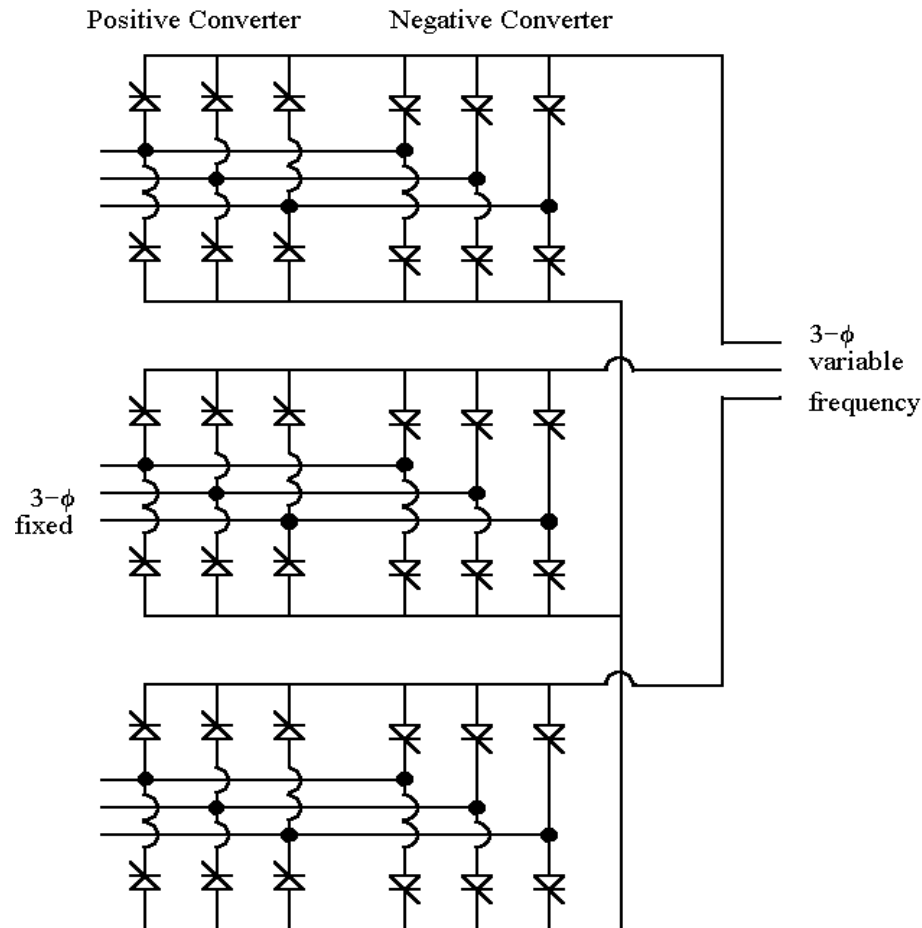
la tensión de la fuente resulta:

$$V_{dc} = \frac{V_a}{(1 - \delta)}$$



8.6 CONVERSIÓN AC-AC: CICLOCONVERTIDOR

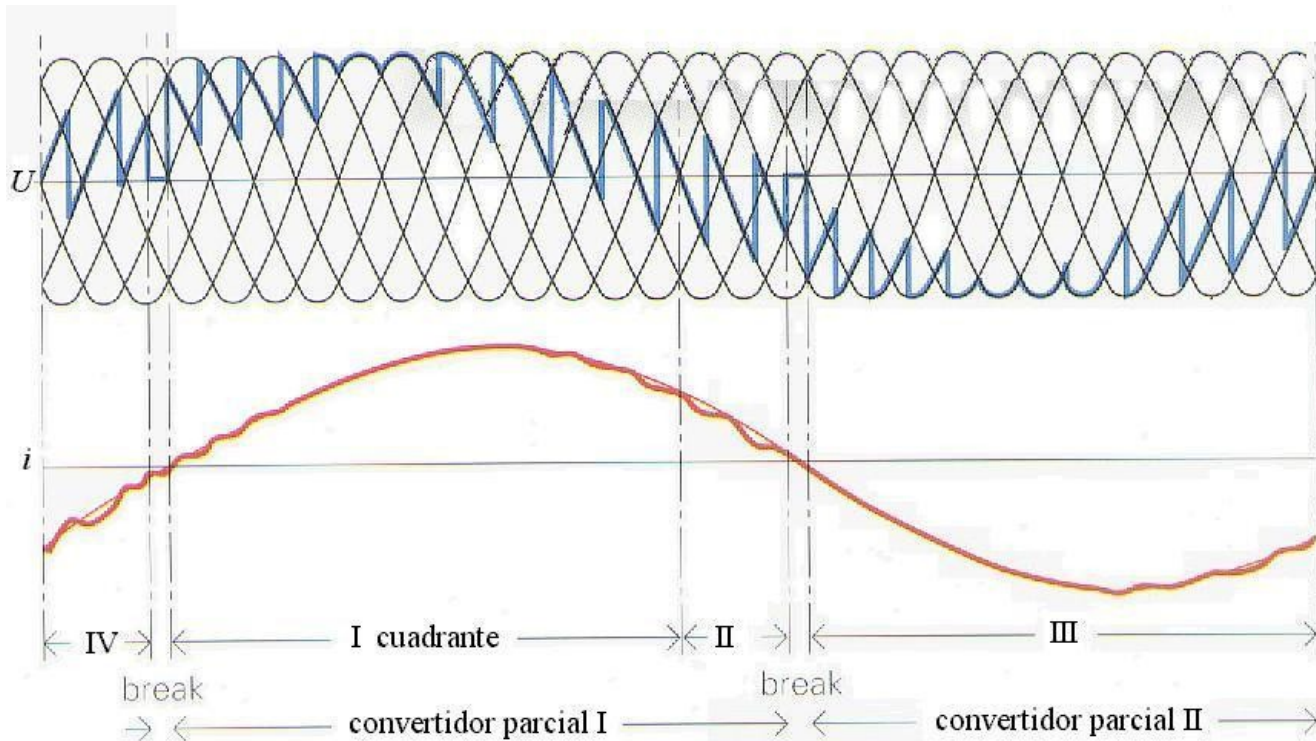
Permiten obtener una salida AC, de magnitud y frecuencia controlada a partir de una entrada fija, usando dos rectificadores en antiparalelo por fase.





8.6 CONVERSIÓN AC-AC: CICLOCONVERTIDOR

Los rectificadores así usados permiten obtener tanto el semiciclo positivo como negativo, y con un control adecuado, la magnitud y frecuencia deseada a la salida.



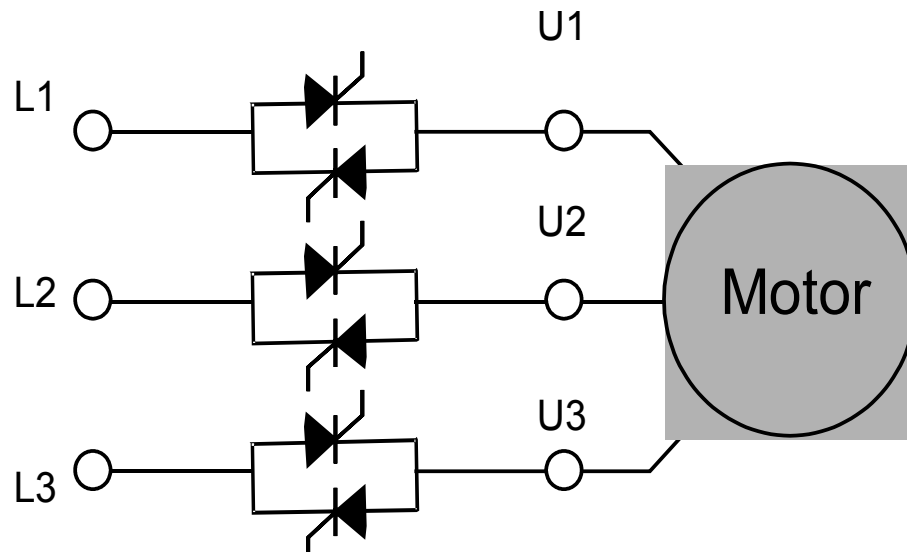


8.7 PARTIDORES Y/O ARRANCADORES SUAVES

Utilizados en motores y generadores tanto en su arranque y detención. En máquinas de inducción:

- Evitan la elevadas corrientes,
- Regulan el torque según la carga, el de aceleración y el de detención progresiva.

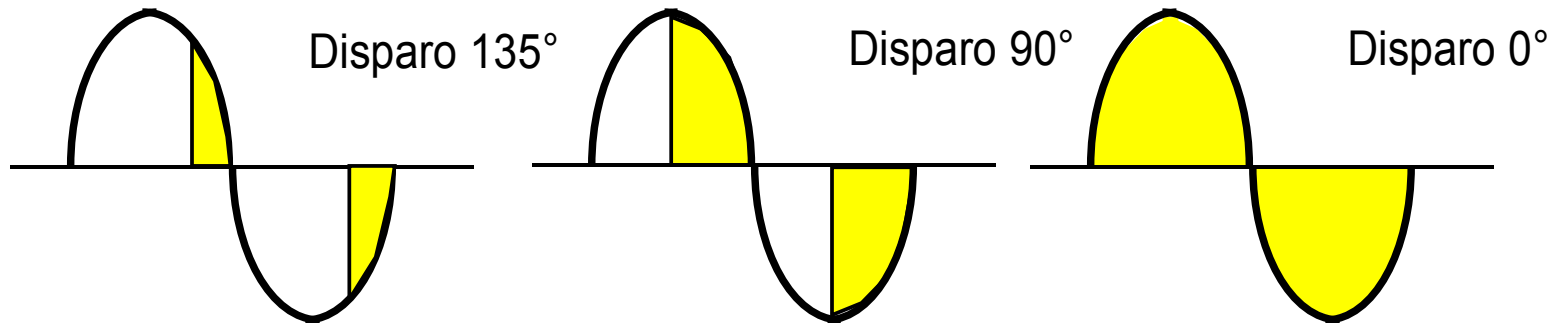
El partidor se compone de dos tiristores en antiparalelo:





8.7 PARTIDORES SUAVES

La tensión aplicada al motor para tres ángulos de disparo:



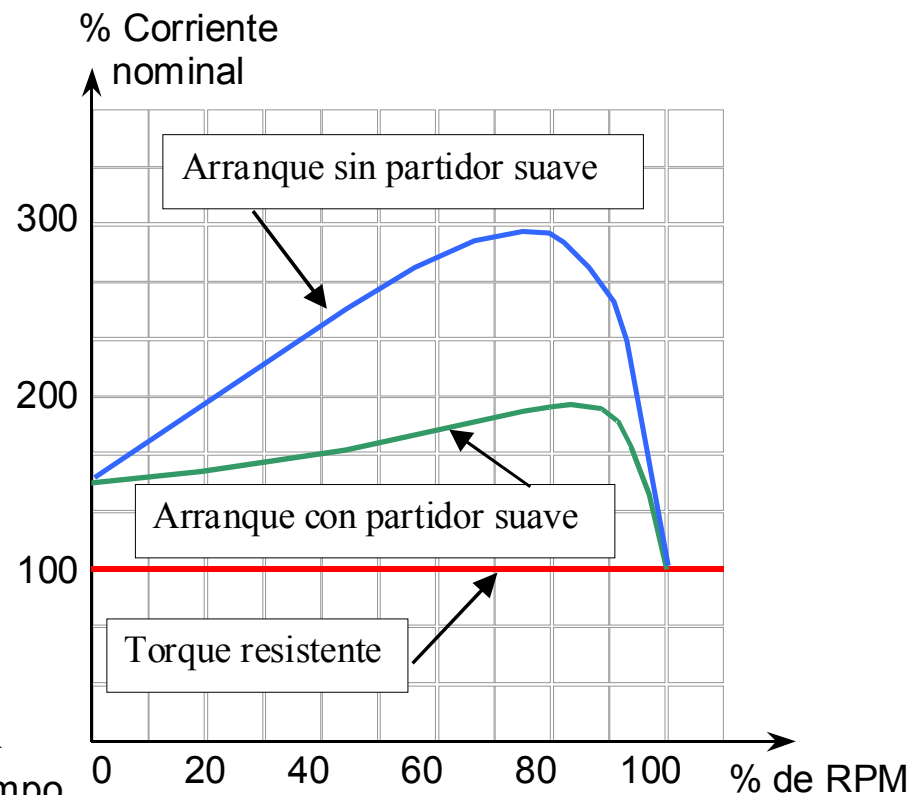
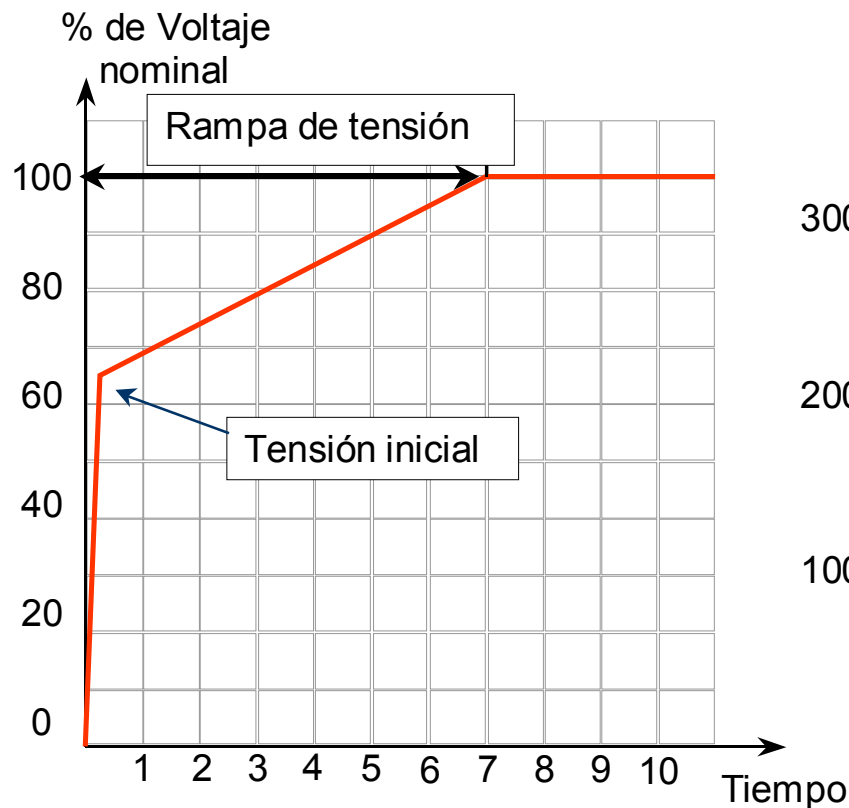
Las diversas formas de controlar el arranque de un motor o conexión a la red de un generador son:



8.7 PARTIDORES SUAVES

Arranque por rampa de tensión: la tensión aplicada se aumenta con una pendiente determinada. Útil para arranques pesados.

Rampa de tensión:

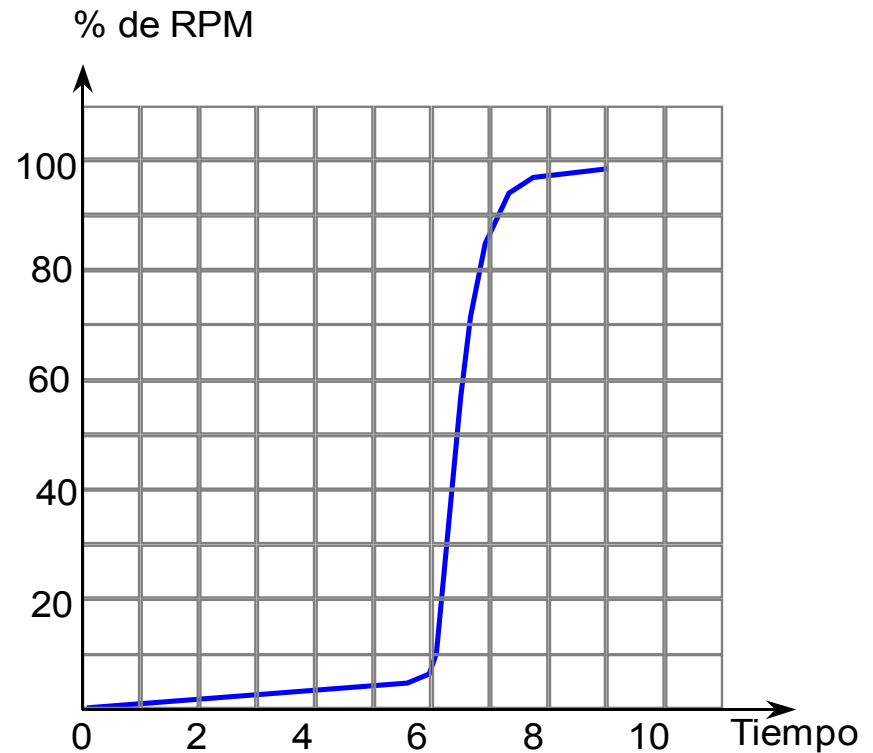
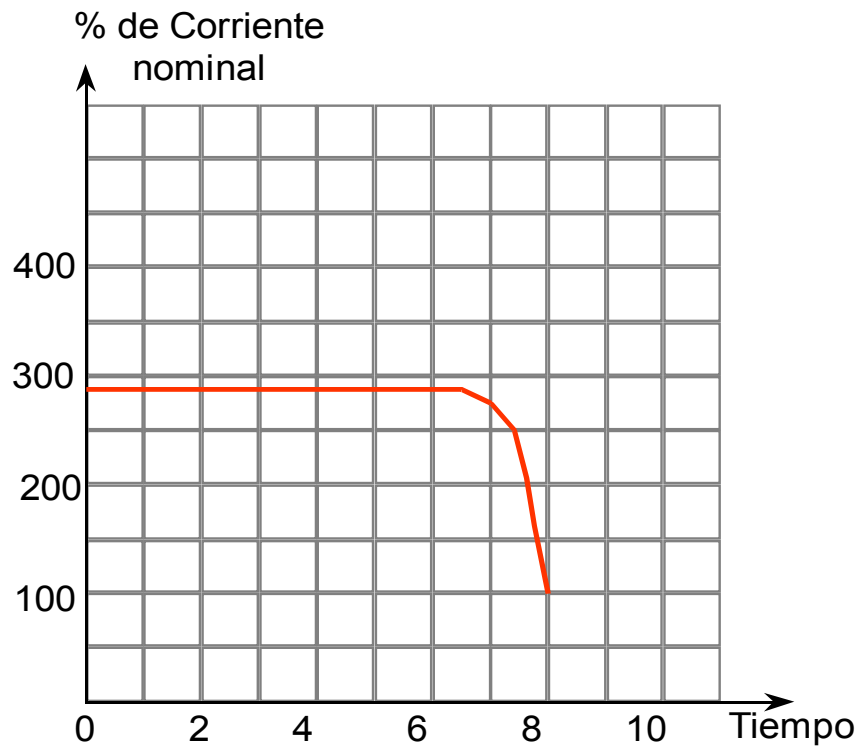




8.7 PARTIDORES SUAVES

Arranque por rampa de corriente: la corriente parte con un valor limitado y decae con una rampa cuando se alcanzan las condiciones nominales. Se usa en cargas livianas.

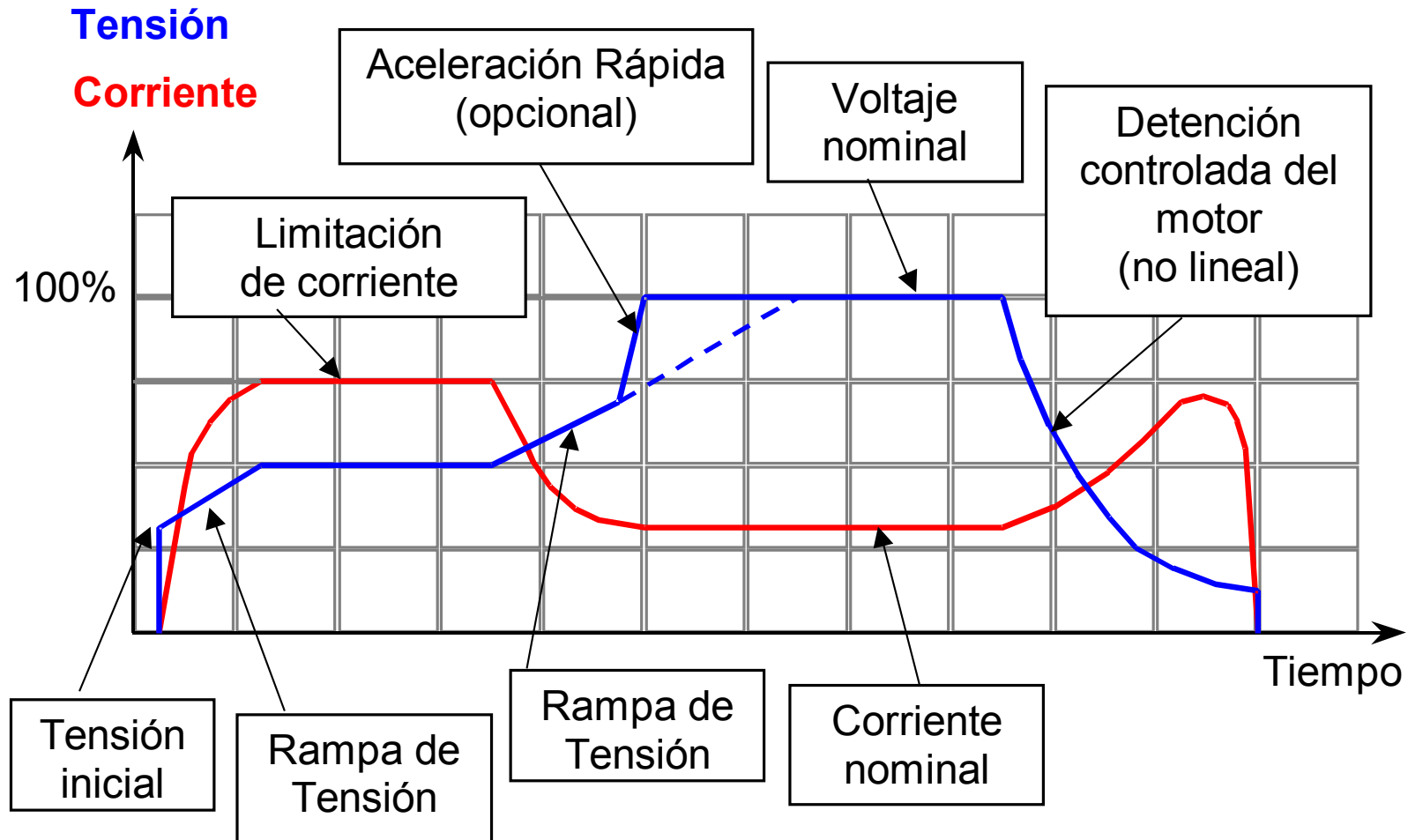
Rampa de corriente:





8.7 PARTIDORES SUAVES

Arranque por rampa de tensión y límite de corriente: combinación de las anteriores.





L1, L2, L3



- K1 On
- K2 Off

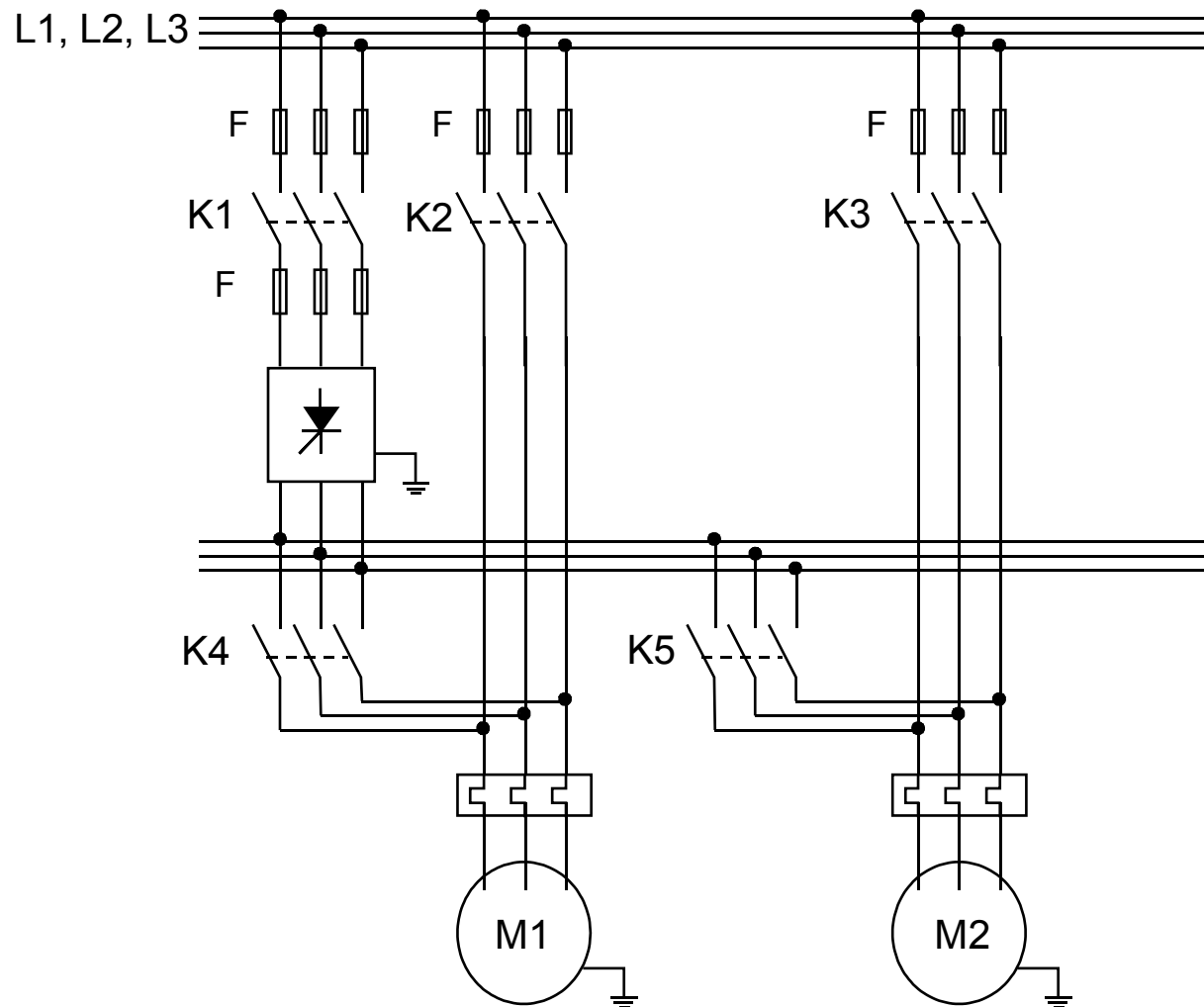
En régimen Permanente:

- K1 On
- K2 On
- Partidor apagado



8.7 PARTIDORES SUAVES

Para un accionamiento secuencial de motores:



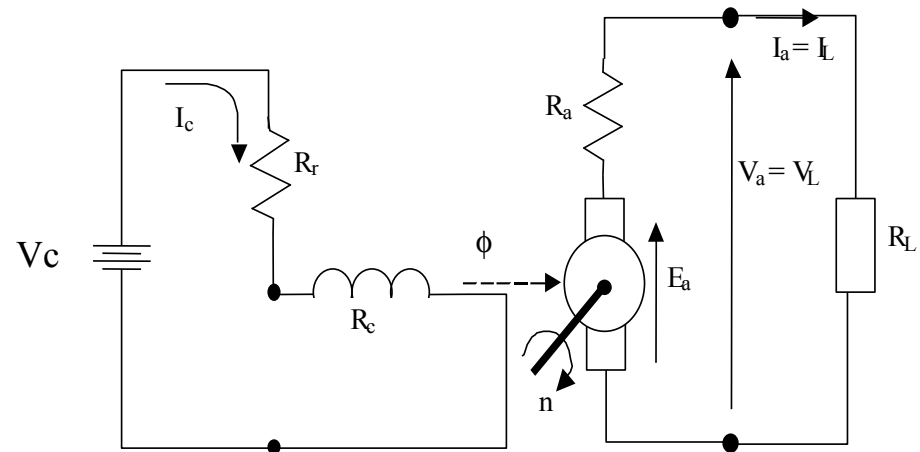
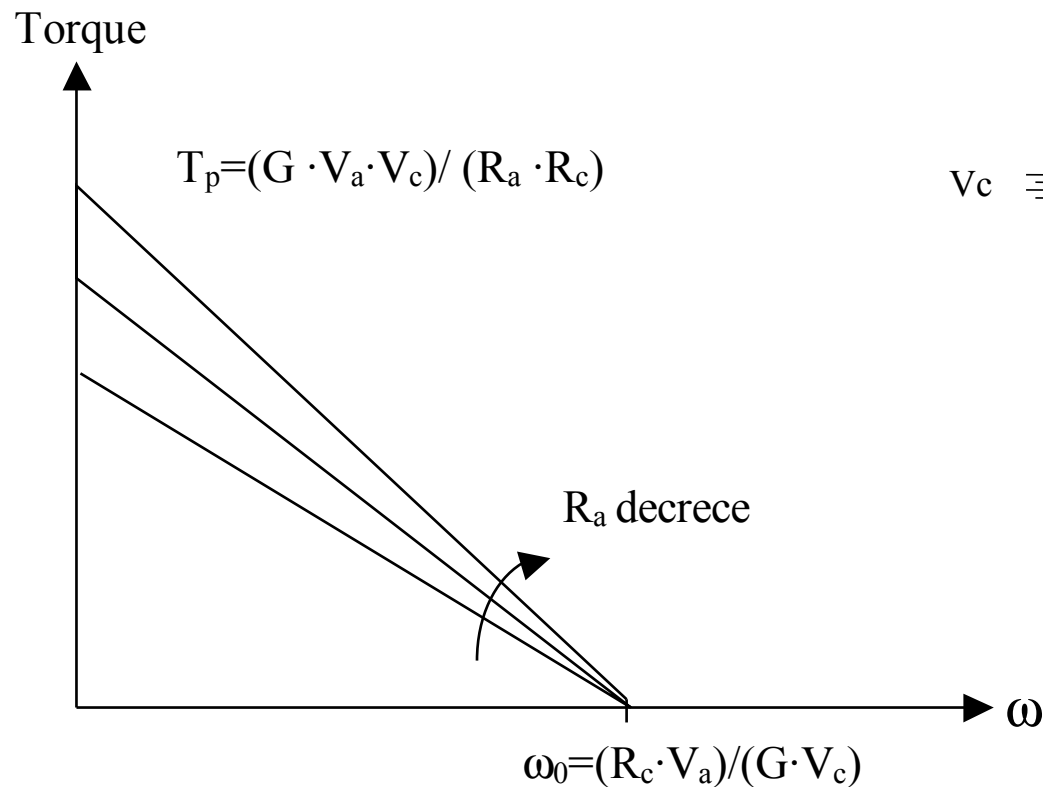
1. M1: K1 On, K4 On
2. M1 en condiciones nominales
3. K2 On,
K1 Off y K4 Off
4. M2: K1 On, K5 On
5. M2 en condiciones nominales
6. K3 On,
K1 Off, K5 Off



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

□ CONTROL DE MOTORES DE CC

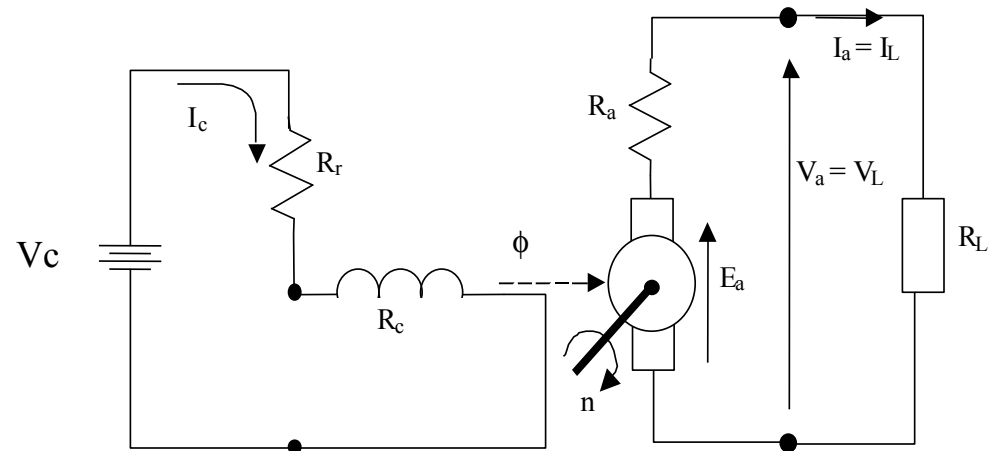
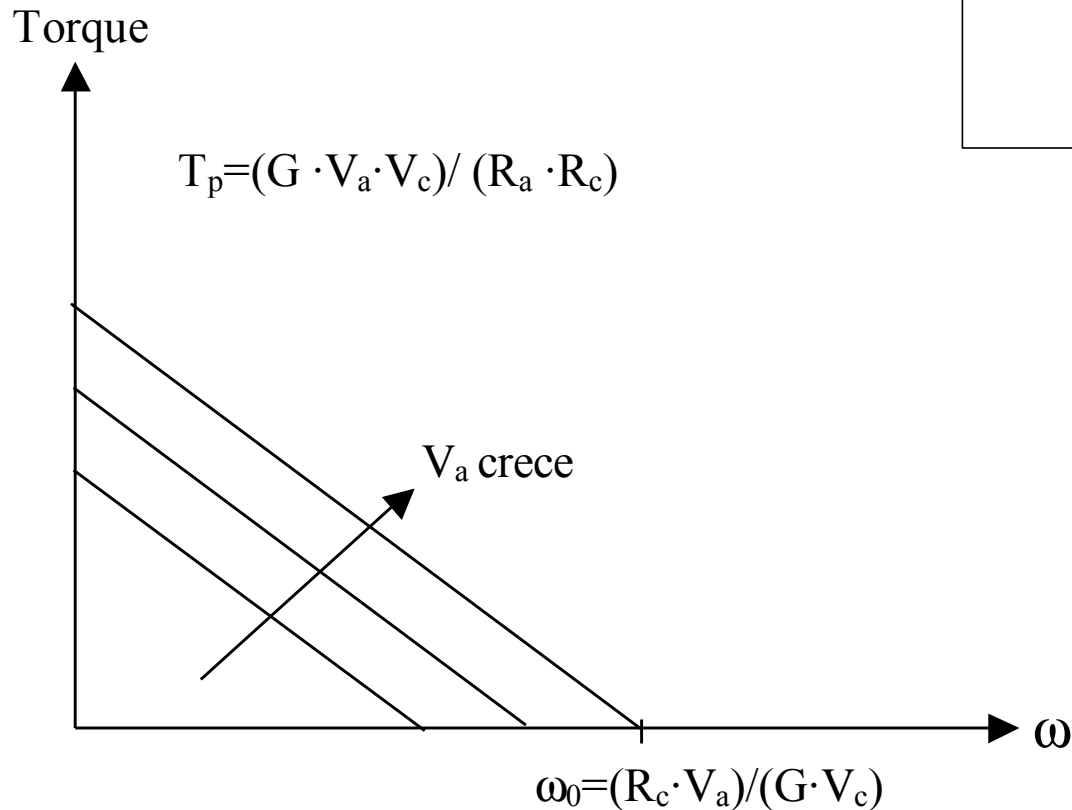
En un motor de excitación separada, al variar la resistencia de armadura, se tiene:





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

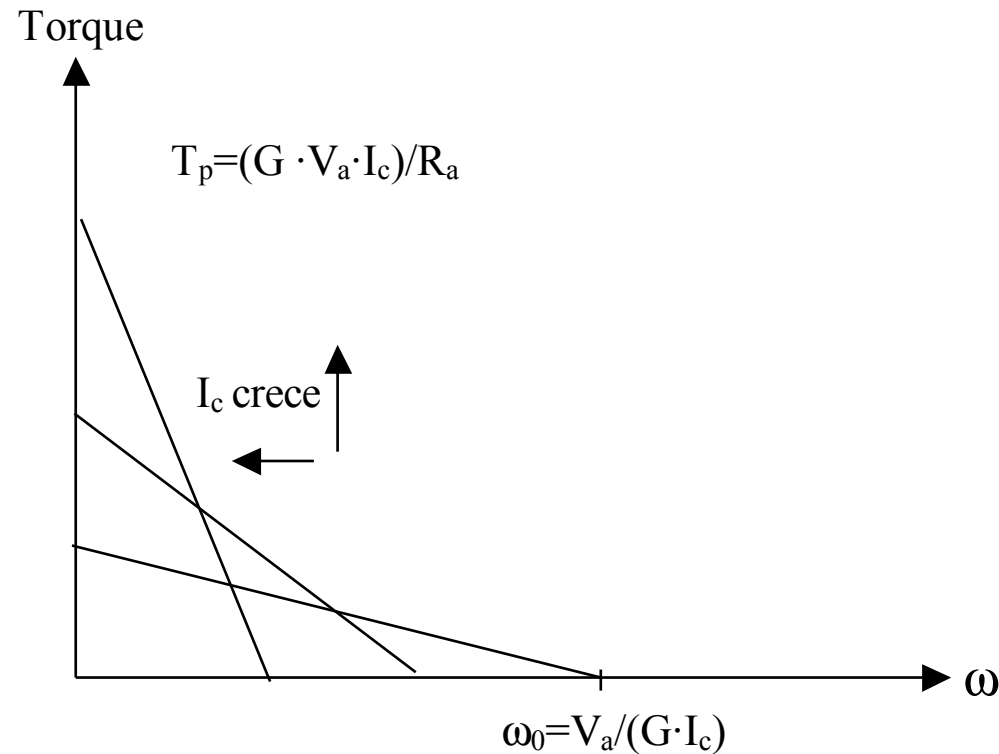
Variando la tensión de armadura:





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

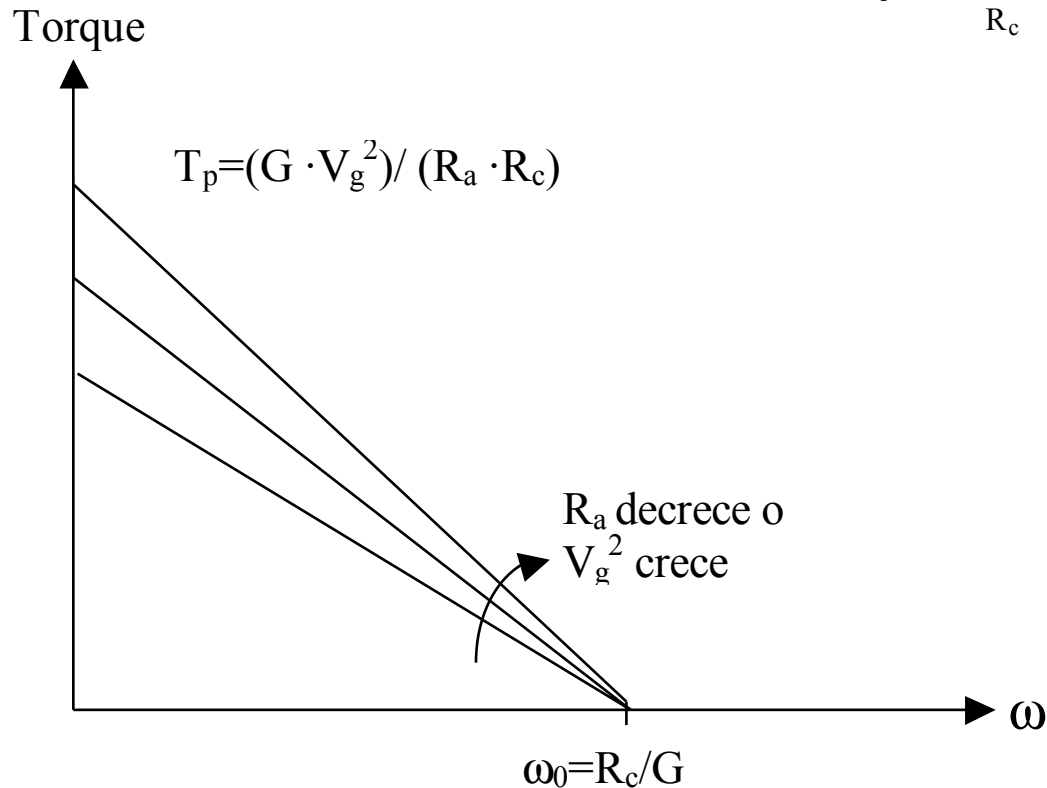
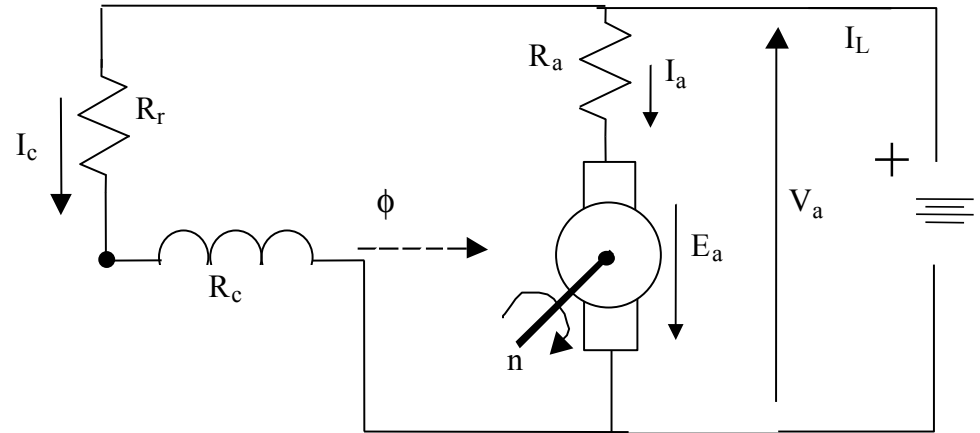
Al variar la corriente de campo I_c :





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

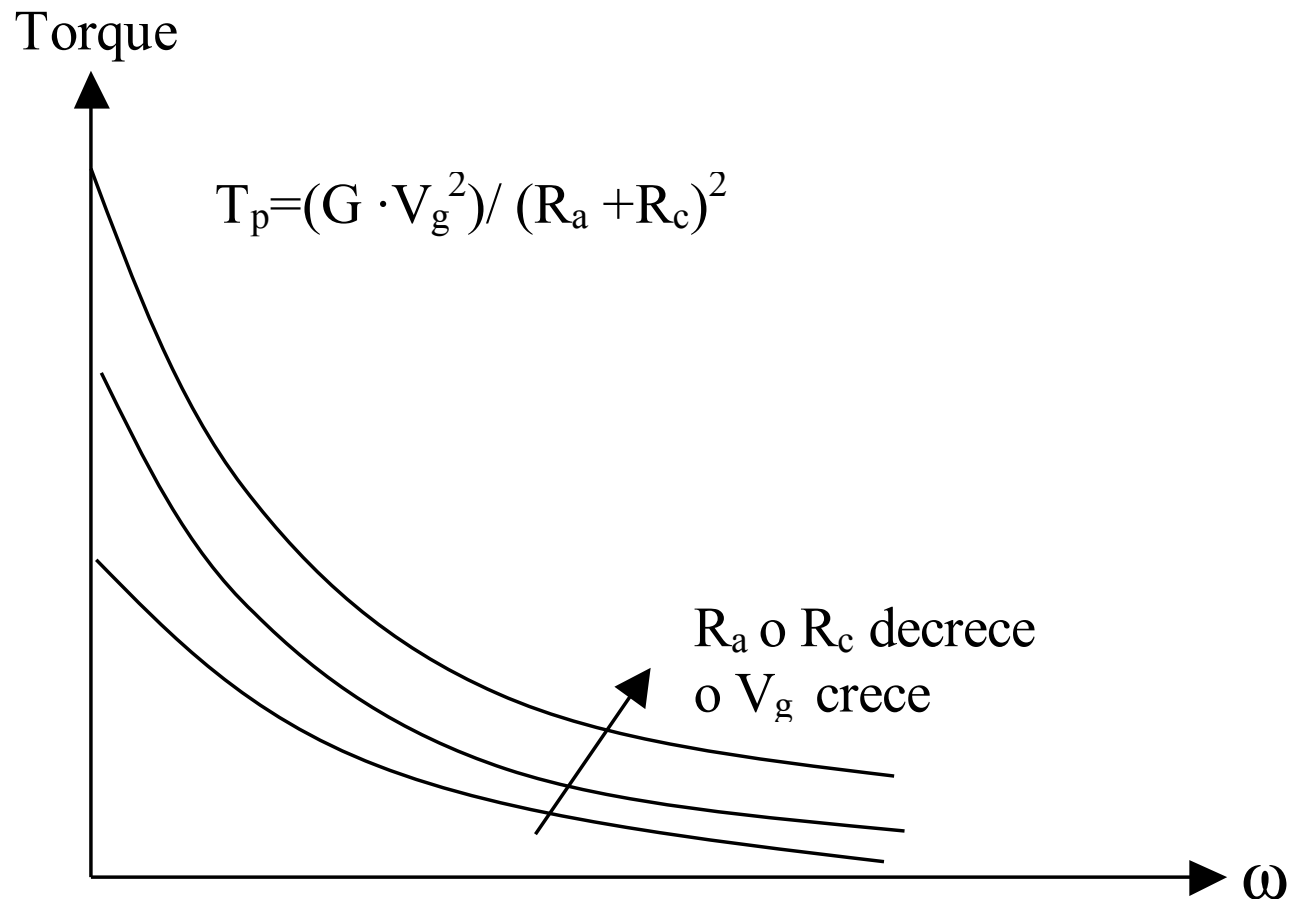
En el caso de un motor shunt:





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

En el caso de un motor serie:

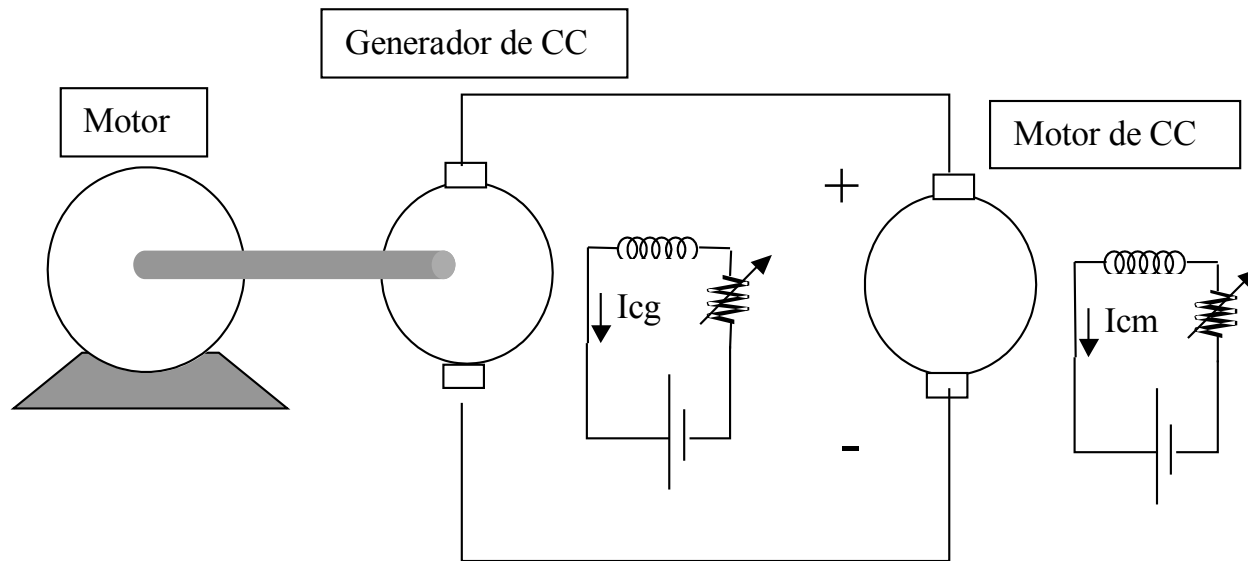




8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Las opciones para el control de la alimentación del motor tanto en la partida como en operación, son:

Grupo Ward-Leonard: control sobre la tensión de salida de un generador de CC, que alimenta al motor en cuestión.

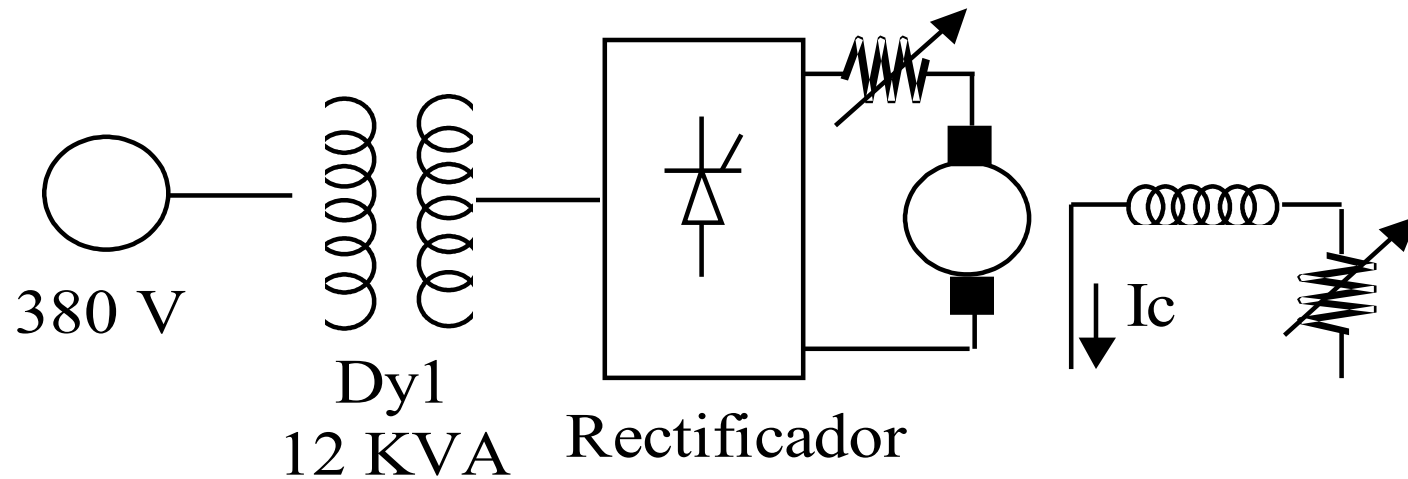




8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Convertidor de CC a CC (Chopper): se usa frente a una tensión continua no regulada.

Convertidor de AC a CC (Rectificador): se usa cuando la tensión primaria es alterna.

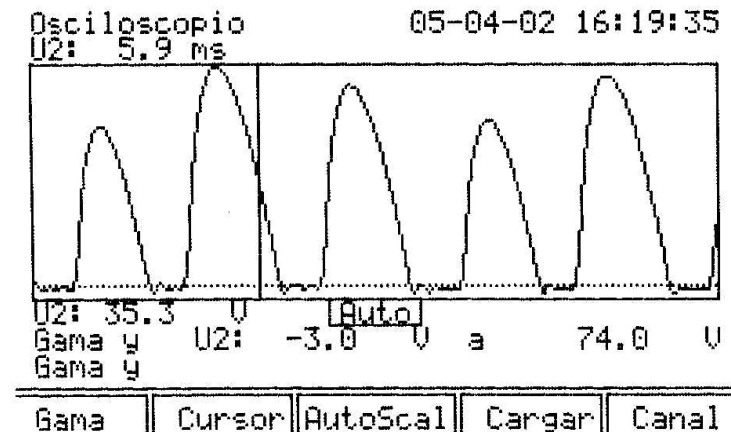
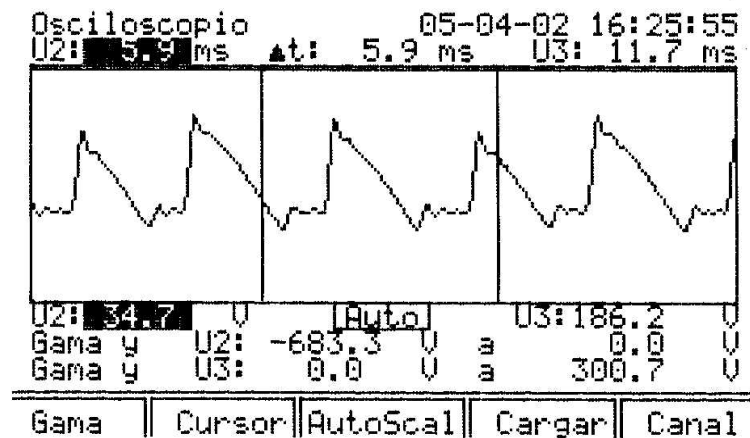




8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

El arranque se realiza con un ángulo de disparo de 90° , luego, progresivamente se disminuye cercano a 0° , para evitar contaminación armónica en el lado AC y torques pulsatorios en el motor.

Gráficamente, el comportamiento del motor mediante el rectificador:



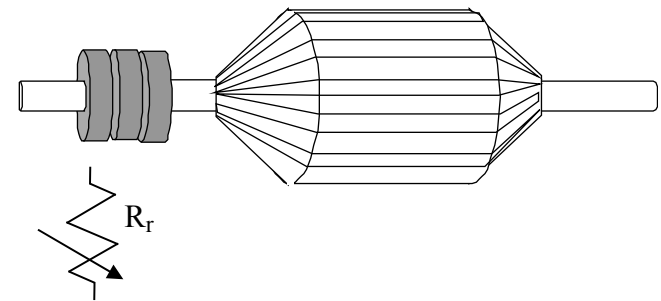
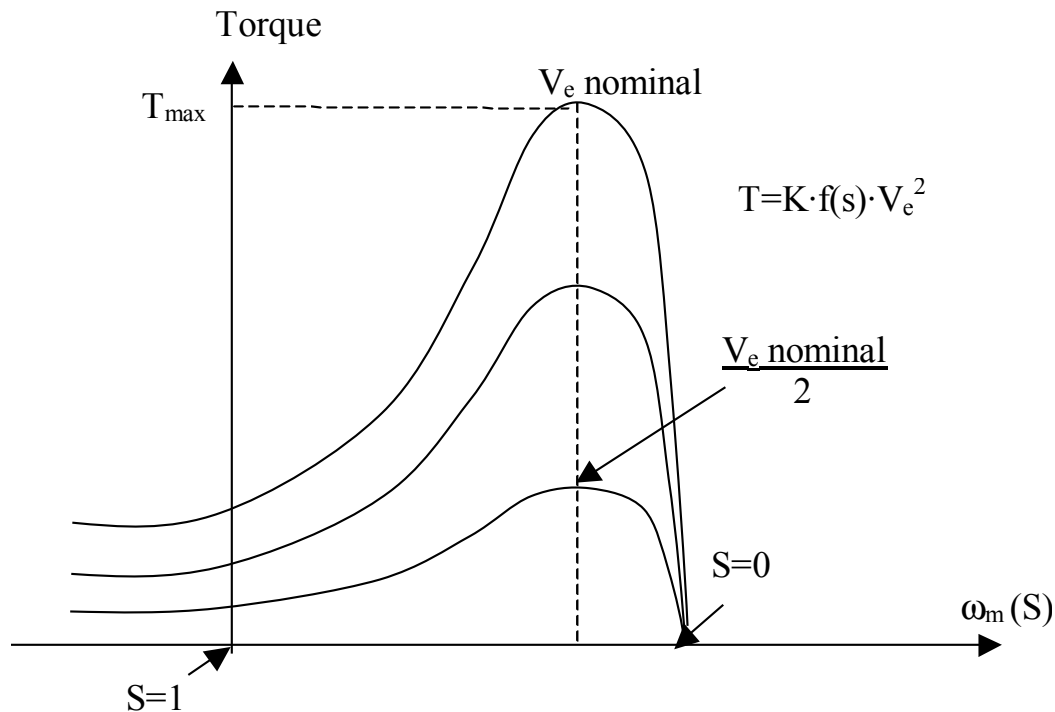


8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

□ CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN

La velocidad y torque se puede controlar a través del **voltaje o la frecuencia de alimentación** y para rotor bobinado, variando la **resistencia rotórica**.

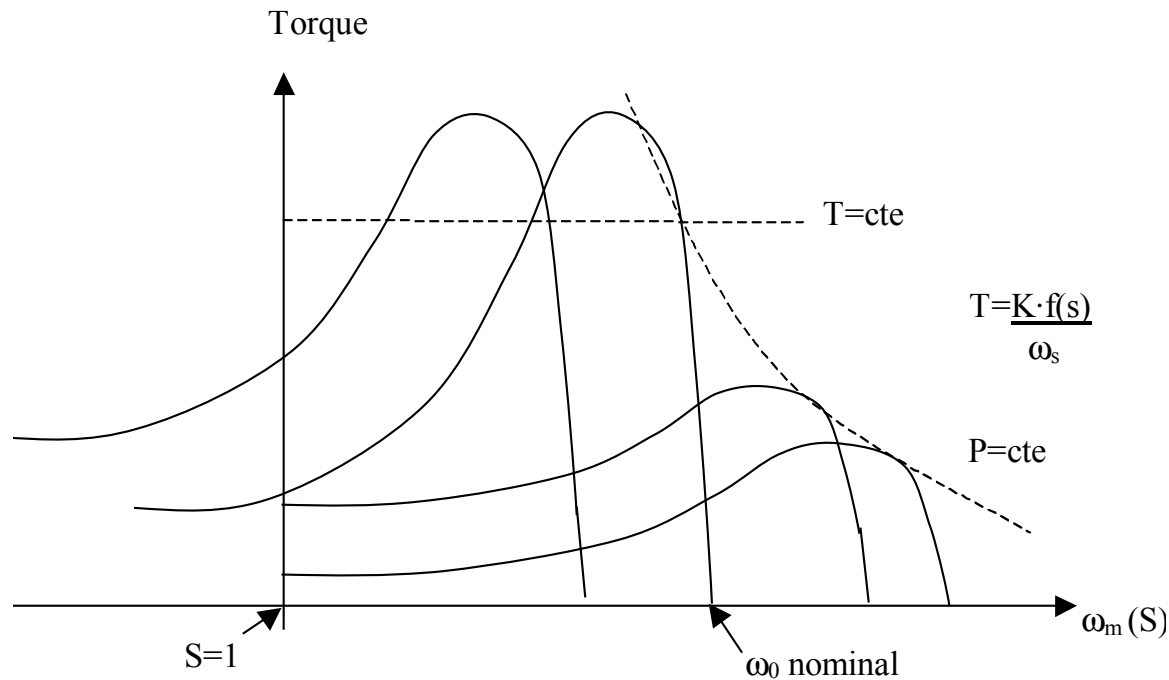
El comportamiento del motor frente a un control del voltaje, sería:





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Frente a un control de frecuencia, al bajar ésta se debe reducir también el voltaje del estator para evitar la saturación.





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Para el arranque del motor de inducción se tienen las alternativas de conexión:

Directa: no se reducen la corrientes de arranque. Útil en motores pequeños.

A través de reóstatos: resistencias en serie con la alimentación del estator, las que se van cortocircuitando.

A través de un autotransformador: mejor control, pero más costoso.

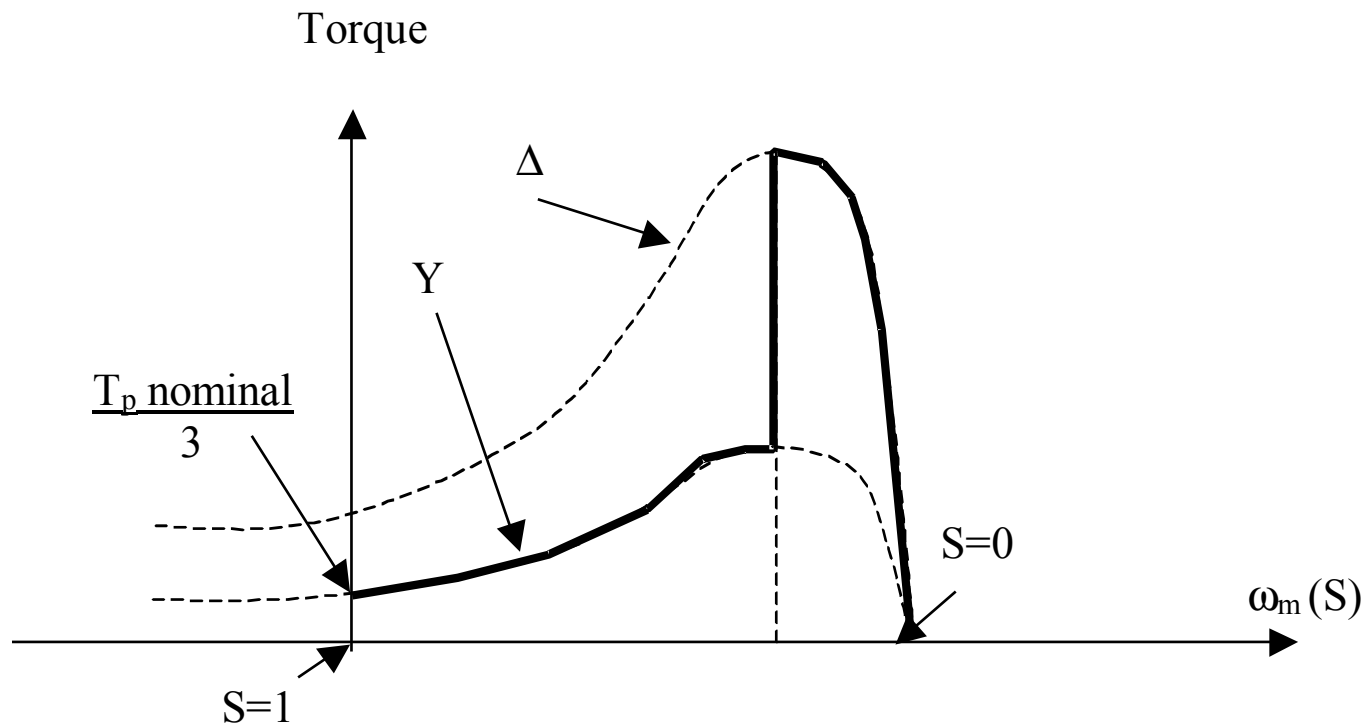
Partidor estrella-delta: se arranca con la alimentación conectada en estrella, y en cierto punto de operación, se conecta en delta.

Partidores suaves.



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

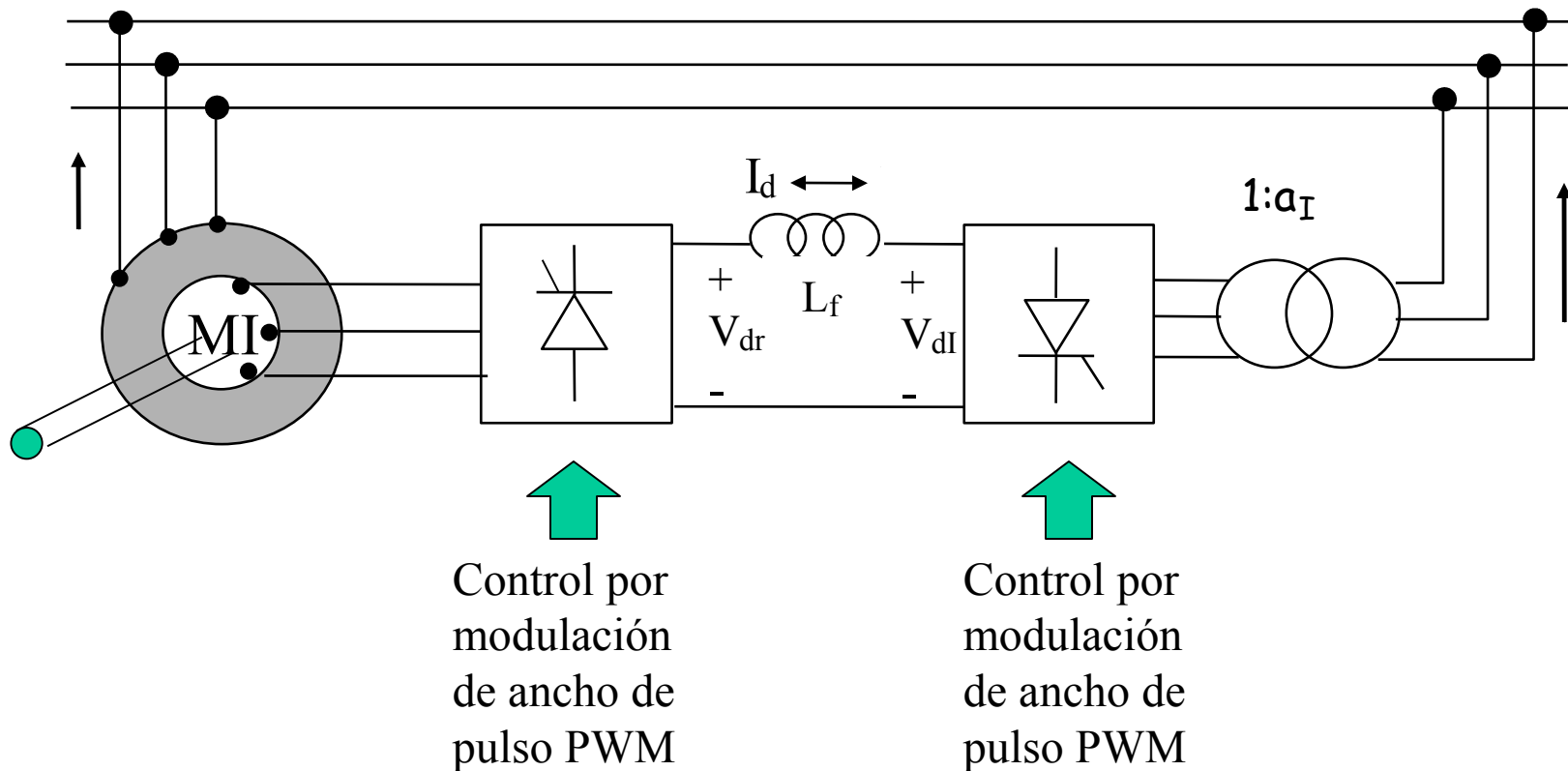
En el caso del partidor estrella-delta, gráficamente se tendría:





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

En rotores bobinados se usa el control Kramer, que se basa en un grupo rectificador-inversor conectado al rotor.





8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Posee como características:

- El control recae sobre la conmutación de las válvulas del inversor.
- Tiene un nivel de rizado que es filtrado por L_f .
- El rectificador opera con factor de potencia unitario.

El principio de operación es:

- La velocidad del motor se controla a través del *ángulo de encendido de los tiristores* del inversor.
- El encendido del puente permite regular V_{dI} e I_d . Cuando el ángulo de disparo aumenta V_{dI} disminuye hasta ser menor que V_{dr} , permite la circulación de I_d .

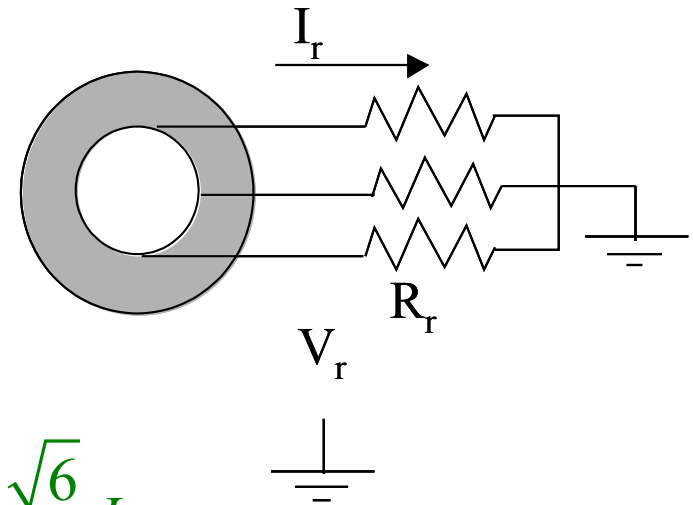


8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

- El inversor opera en la práctica con un ángulo de disparo de 150° , para que trabaje con un factor de potencia unitario.

El rotor ve al rectificador como una resistencia:

$$R_r = \frac{V_r}{I_r} \quad (\text{por fase})$$



Por otro lado, se tiene:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{dr}, & I_r &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \\ &= R_r \frac{\pi^2}{18} \frac{V_{dr}}{I_d} \end{aligned}$$



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

De este modo:

$$V_r = \frac{s}{a} V_e, \quad a = \frac{N_e}{N_r}$$
$$= V_{dr} \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{\omega_d}{\omega_s} \frac{V_e}{a}, \quad s = \frac{\omega_d}{\omega_s}$$

Además:

$$V_{dI} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{V_e}{a_I} \cos(\gamma)$$

donde a_I es la razón de transformación en el lado de alterna del inversor y γ es el ángulo de disparo de los tiristores.



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

Haciendo un balance de potencia a la salida y a la entrada, se obtiene:

$$\frac{\omega_d}{\omega_s} = A \cos(\gamma), \quad A = \frac{a}{a_I}$$

Por lo tanto, la ley de control del inversor es:

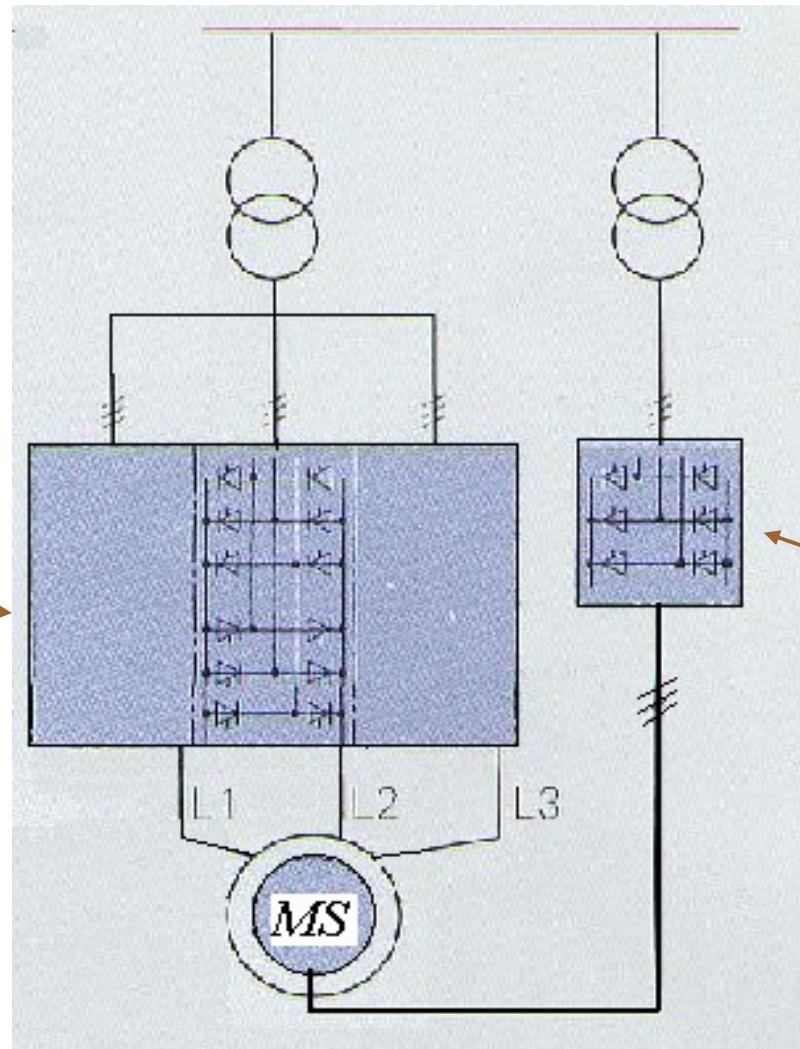
$$\omega_m = \omega_s \left(1 - A \cos(\gamma) \right)$$



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

❑ CONTROL DE MOTORES SÍNCRONOS

Diseñados para operar a altas potencias carga: 10.000 – 50.000 [HP]. Usualmente se controlan a través de cicloconvertidores.



Rectificador controlado



8.8 APLICACIÓN DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA AL CONTROL DE MOTORES

El cicloconvertor recibe la frecuencia de la red y la reduce de manera de regular la RPM de alimentación del motor de acuerdo a la carga.

- Son eficientes, ocupan un espacio reducido.
- Producen armónicos que se cuantifican en una variación de un 2% sobre el torque de la máquina.

