



Roberto Cárdenas Dobson, Msc. Ph.D

Profesor Titular, U. Chile

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile



Control de la Máquina de Corriente Continua Utilizando Electrónica de Potencia



Referencias

Control of Electrical Drives by Werner Leonhard.

Power Electronics and Applications by Mohan and
Undeland.

Máquina de Continua

- En la actualidad la máquina de continua, tradicional, es menos utilizada.
- Las principales desventajas son constructivas, por ejemplo el colector y las escobillas producen problemas de mantenimiento.
- Su precio es mayor que la máquina de inducción jaula de ardilla.

Máquina de Corriente Continua

- Una de las aplicaciones típicas de los rectificadores controlados y conversores DC-DC se encuentra en el control de la máquina de corriente continua.
- Esta máquina tiene muy buena respuesta dinámica y mantiene el control del flujo y del torque desacoplado. Es decir se puede regular o cambiar uno de ellos sin afectar el otro.
- Por mucho tiempo, hasta la aparición del control vectorial, la máquina de inducción no podía competir con la máquina de corriente continua en lo que a dinámica de respuesta se refiere.

Rectificadores basados en Tiristores y Diodos

Rectificadores basados en Tiristores

- Los rectificadores basados en tiristores eran, y aún lo son, muy utilizados para controlar máquinas de corriente continua.
- Son baratos y fáciles de controlar y se pueden utilizar en altas potencias. Se utilizan dos puentes de tiristores (12 dispositivos) en anti-paralelo para efectuar el control en cuatro cuadrantes.
- Los conversores basados en puentes H dc-dc también pueden ser utilizados. Tienen la ventaja de operar en los cuatro cuadrantes.
- Antes de discutir los tiristores, veremos primero el puente de diodos de seis pulsos el cual es completamente no-controlado (conmutación natural para el encendido y el apagado).

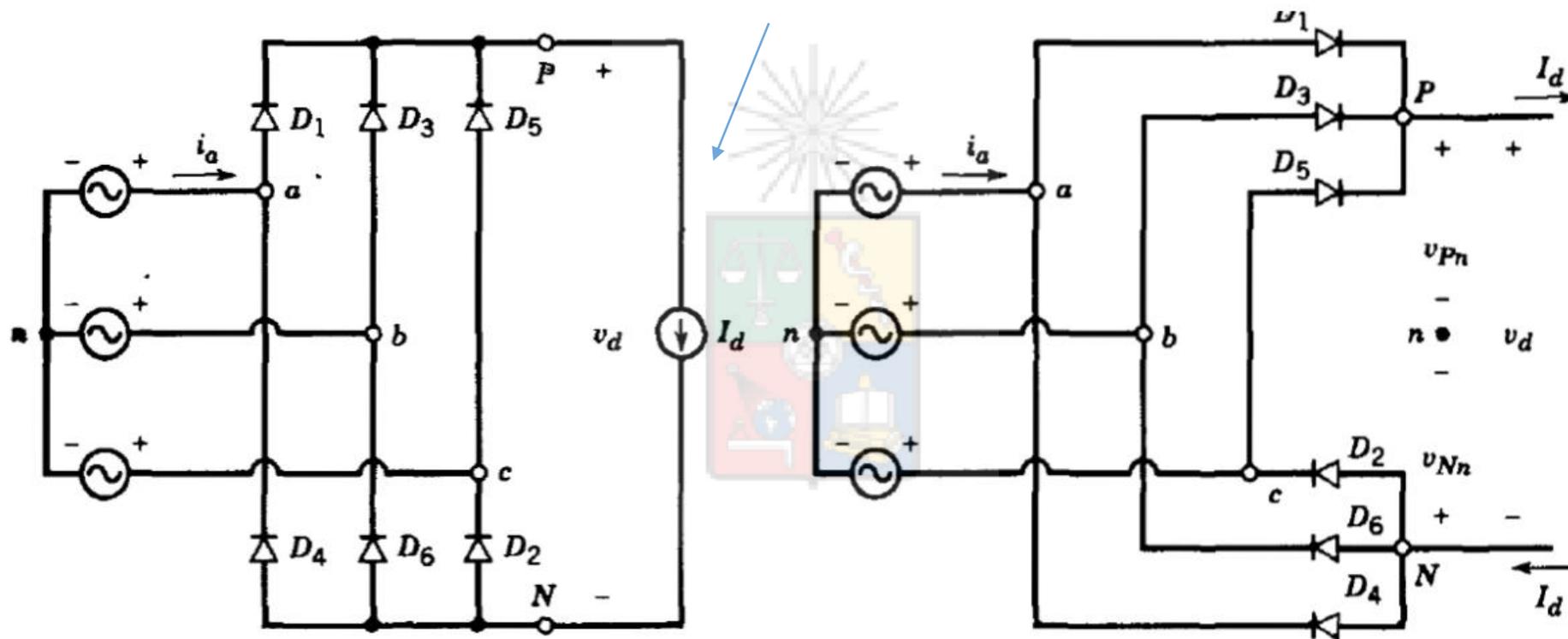


Puente de Diodos

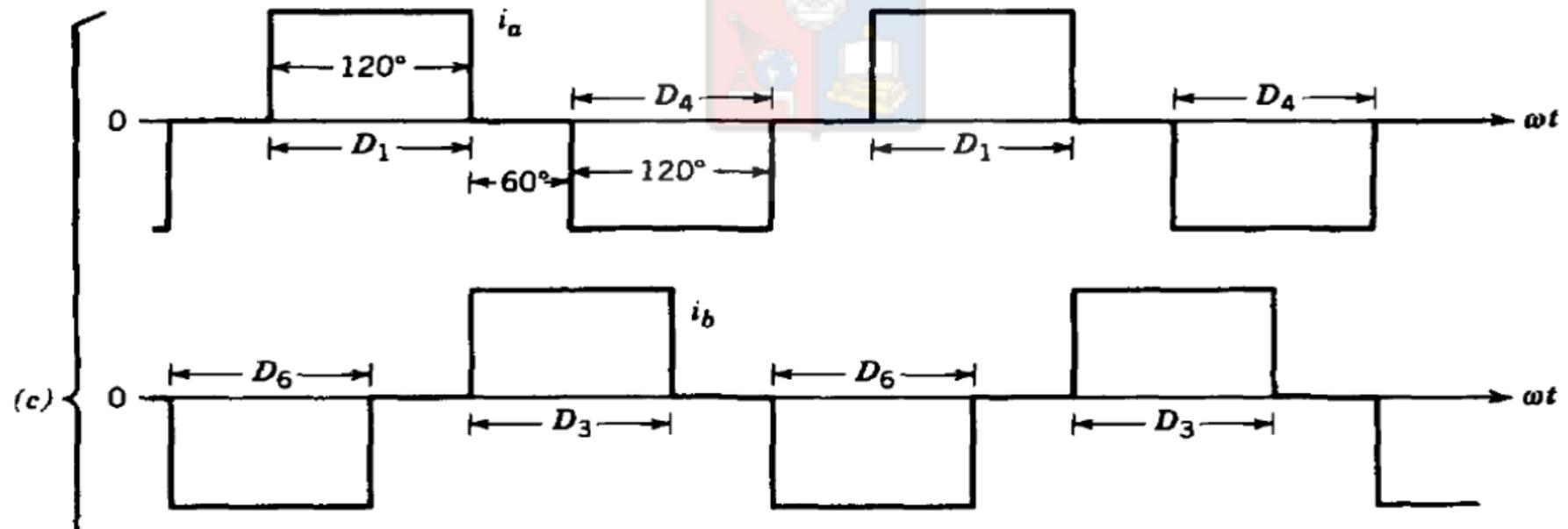
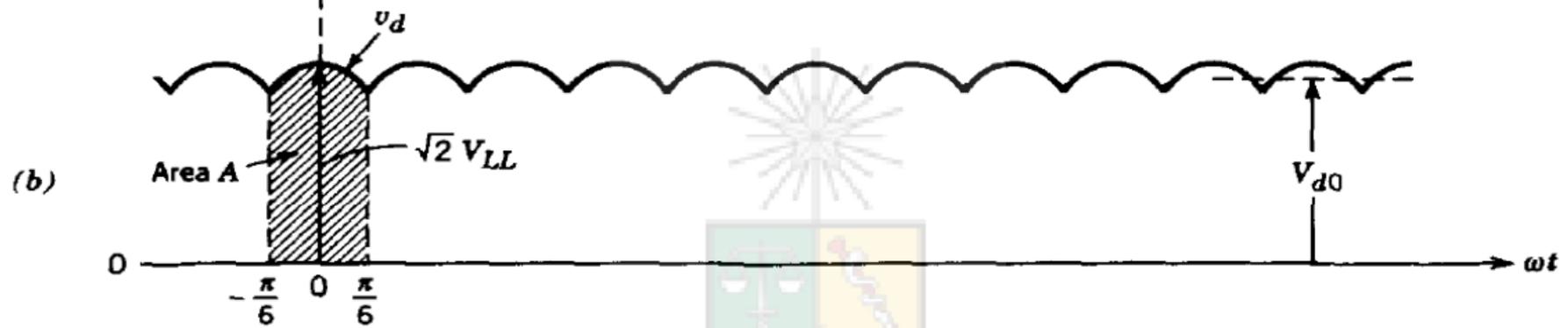
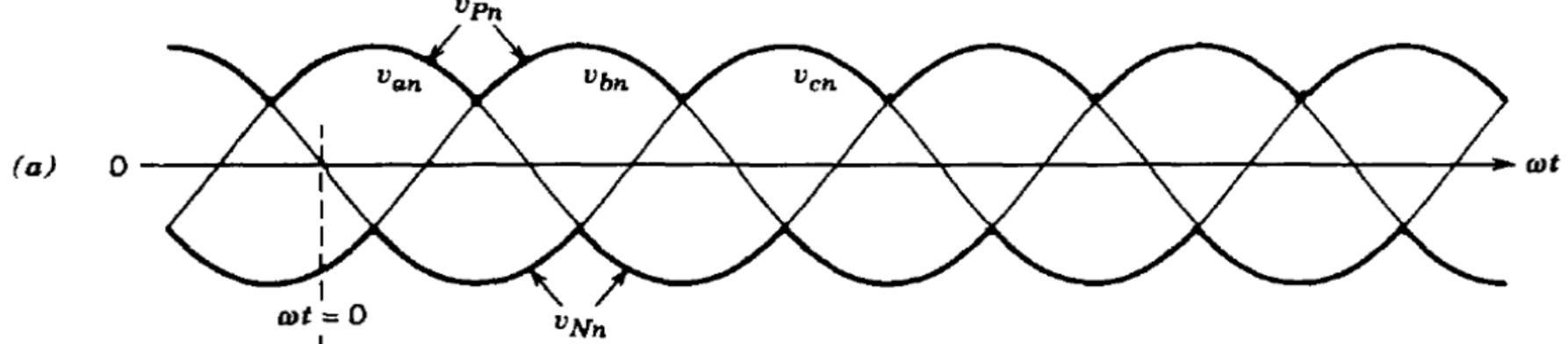


Considerando Corriente Plana

Se asume que la inductancia de la máquina DC es muy grande



Corriente plana o casi plana se obtiene en carga inductivas.
Utilizar corriente plana es el método estándar de análisis.



Ecuaciones

$$V_{do} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}V_{LL} = 1.35V_{LL}$$

$$\frac{3}{\pi} V_m = 513V \text{ (para 380V } 3\phi)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d \text{ rms}$$

$$I_{s1} = \frac{1}{\pi} \sqrt{6} I_d = 0.78 I_d \text{ rms fundamental de entrada}$$

$$I_{sh} = \frac{I_{s1}}{h} \text{ rms armónico de orden } h \text{ en la entrada}$$

↑ Fórmulas obtenidas aplicando
Fourier en la corriente
de entrada

¿Diferencias con el variador de frecuencias?

- El inversor o “variador de frecuencia” (como se le conoce en la industria nacional) es un conversor fuente de voltaje. En este caso se tiene un condensador muy grande (idealmente de capacitancia infinita) a la salida del puente de diodos . El voltaje medio dc en el condensador se asume igual al máximo del voltaje línea a línea de la entrada ($\approx 537V$).
- En la máquina de continua el sistema está conectado a un bobina muy grande (idealmente infinita) y el valor medio del voltaje es $3/\pi$ (0.955) del máximo línea a línea de la entrada ($\approx 513V$ en Chile). En este caso estamos ante una fuente de corriente en la salida.



Definiciones

- DPF=Displacement power factor. Coseno del ángulo entre la fundamental de voltaje y corriente. En este caso el DPF=1. (factor de desplazamiento es el término utilizado habitualmente en castellano).

- Factor de potencia (PF en inglés). Se obtiene como:

$$- P.F = \frac{\text{Potencia}}{\sqrt{3}V_{LLrms}I_{Lrms}} \quad \leftarrow \quad P.F. = \frac{\sqrt{3}V_{LL} \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right) I_d}{\sqrt{3}V_{LL} \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) I_d}$$

- Los armónicos reducen el factor de potencia.



Definiciones

- Para el rectificado no controlado de seis pulsos, el factor de potencia es de aproximadamente 0.955 y se obtiene como:

$$PF = DPF \times I_{s1}/I_s = 3/\pi$$

- **Esta fórmula puede ser aplicada porque el voltaje de entrada se considera sinusoidal.**

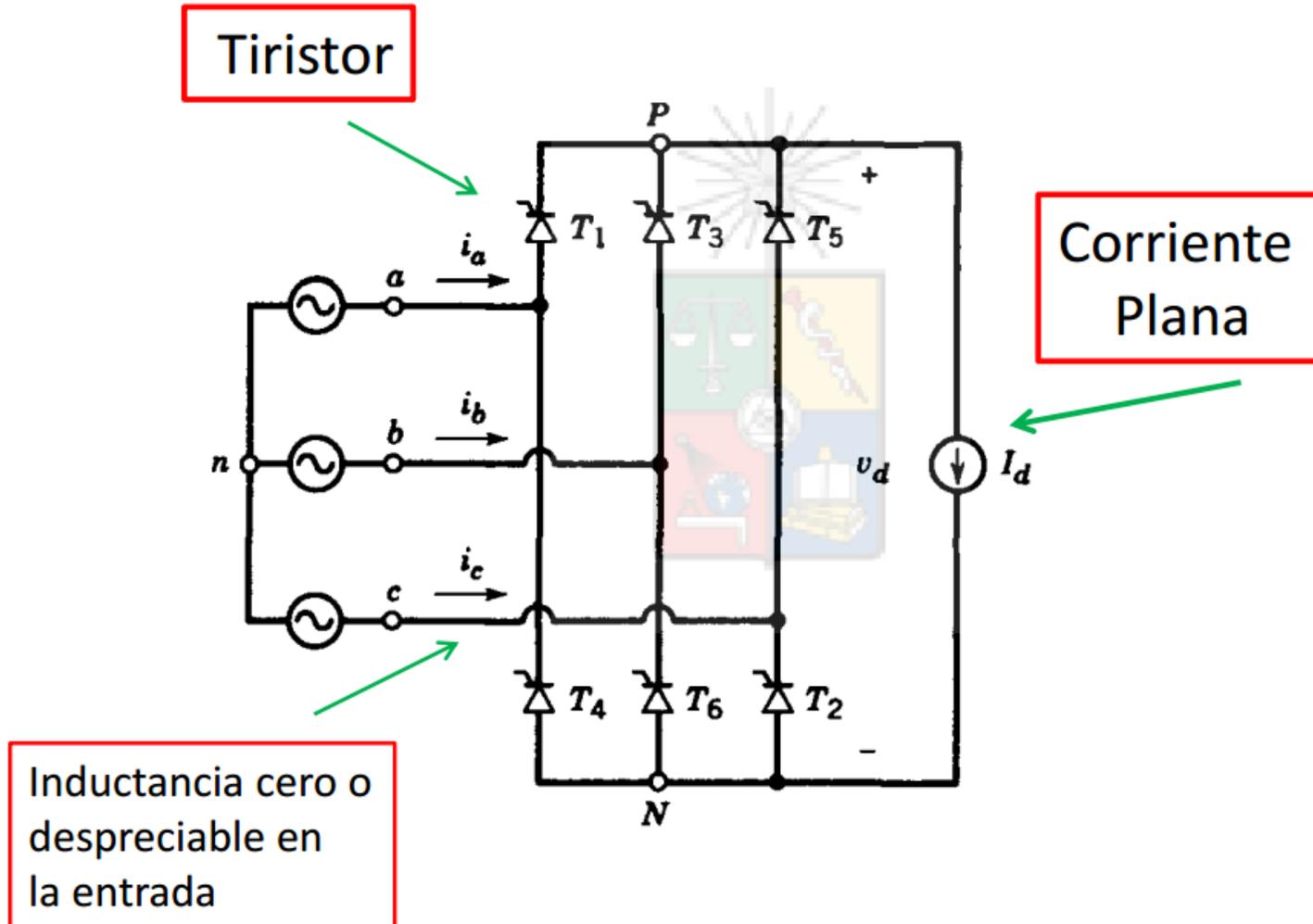
Potencia activa media en la presencia de armónicos

- Recuerde que voltajes y corrientes de distintas frecuencias producen una potencia activa media nula. Son señales ortogonales.
- Si producen potencia instantánea distinta de cero.
- Debido a eso cuando se asume que la fundamental de entrada es sinusoidal de una sola frecuencia, entonces solo la corriente fundamental puede producir potencia activa media.

Rectificador controlado en base a Tiristores



Topología



Tiristor

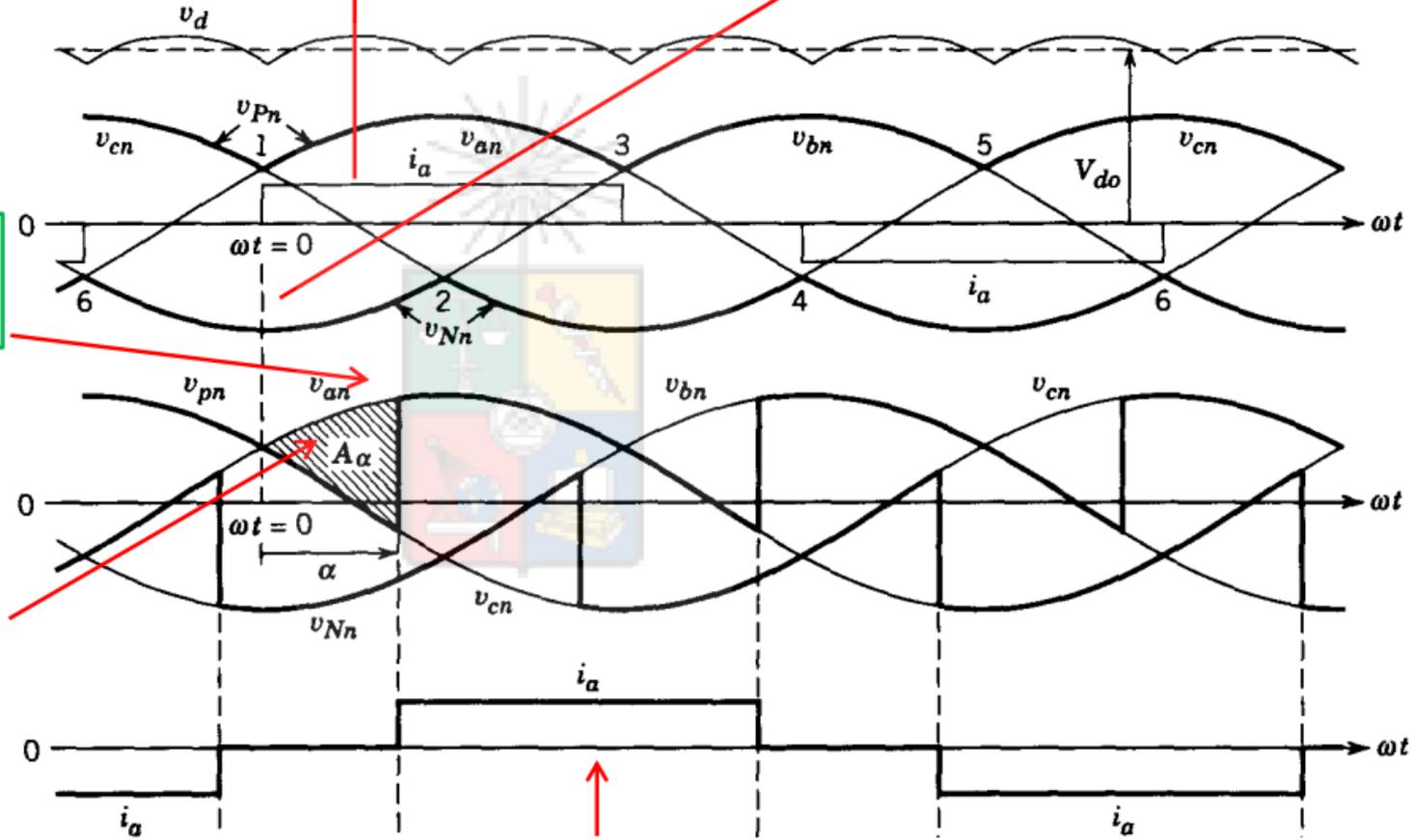
- Dispositivo semicontrolado. Se dispara con un pulso de corriente en la puerta de control.
- Se apaga cuando la corriente es igual a cero. Es de conmutación natural en el apagado.
- Dos tiristores, conectados en antiparalelo, forman un Triac.
- Los dispositivos como el IGBT se denominan de conmutación forzada. El tiristor es un dispositivo de conmutación natural.

Corriente de un
Puente rectificador no
controlado

Desde este punto comienza
a medirse el ángulo de disparo
(habitualmente)

Se aplica señal
de disparo

Área perdida



Corriente de un
Rectificador controlado

Fórmulas

Área perdida.

$$A_{\alpha} = \int_0^{\alpha} \sqrt{2}V_{LL}\sin \omega t d(\omega t) = \sqrt{2}V_{LL}(1 - \cos \alpha)$$

Voltaje medio de salida

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}\cos \alpha$$

Regulando α se controla el valor medio

Fundamental de corriente de entrada

$$I_{s1} = 0.78I_d$$

Corriente rms de entrada

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}}I_d = 0.816I_d$$

Factor de desplazamiento

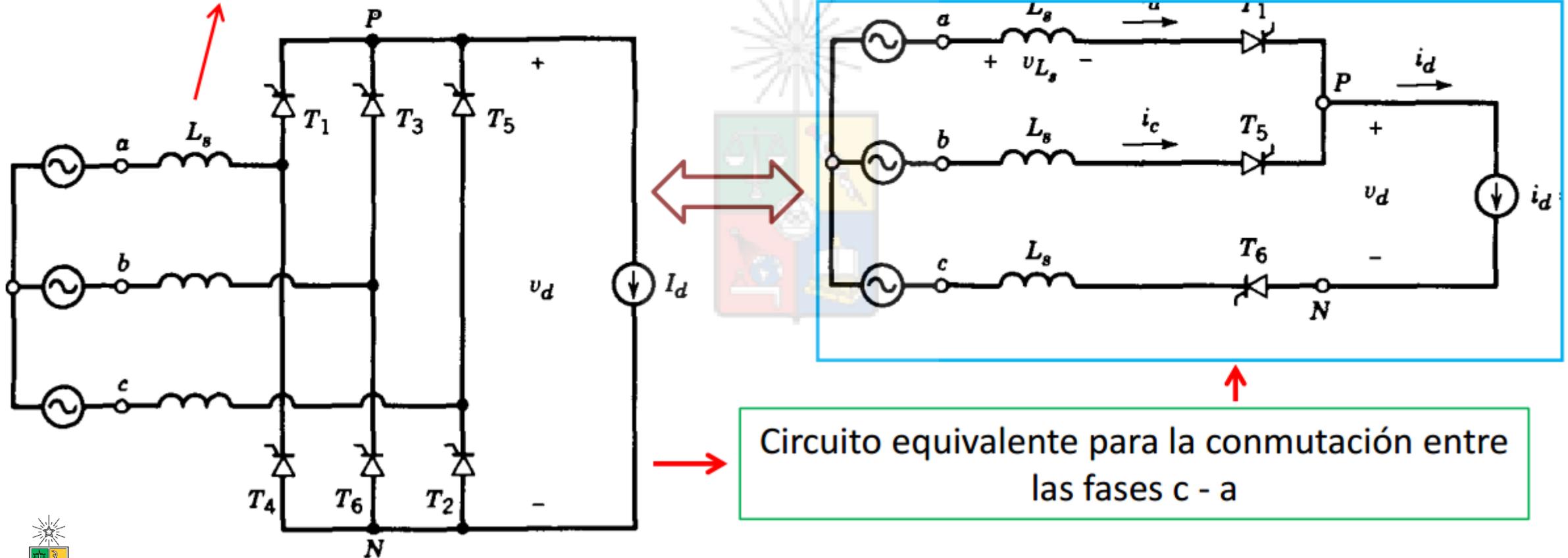
$$\text{DPF} = \cos \phi_1 = \cos \alpha$$

Factor de potencia

$$\text{PF} = \frac{3}{\pi} \cos \alpha$$

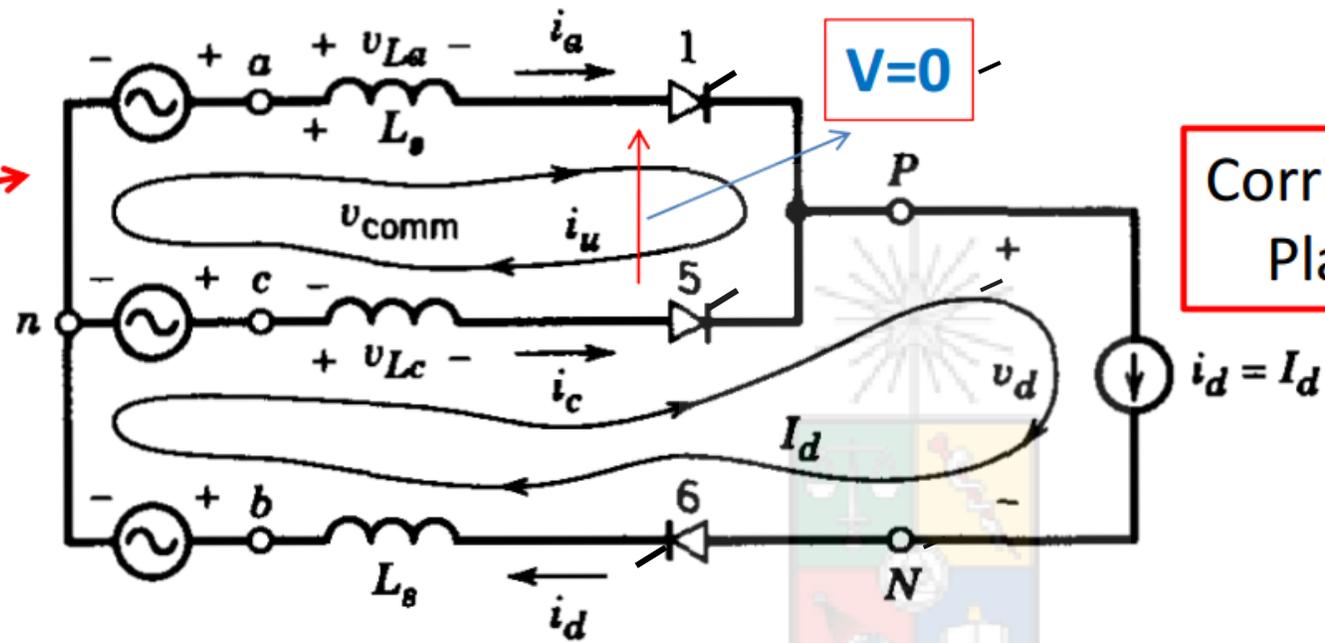
Problemas de conmutación

Corriente en la inductancia no puede bajar a cero bruscamente



Conmutación

$$i_a + i_c = I_d$$



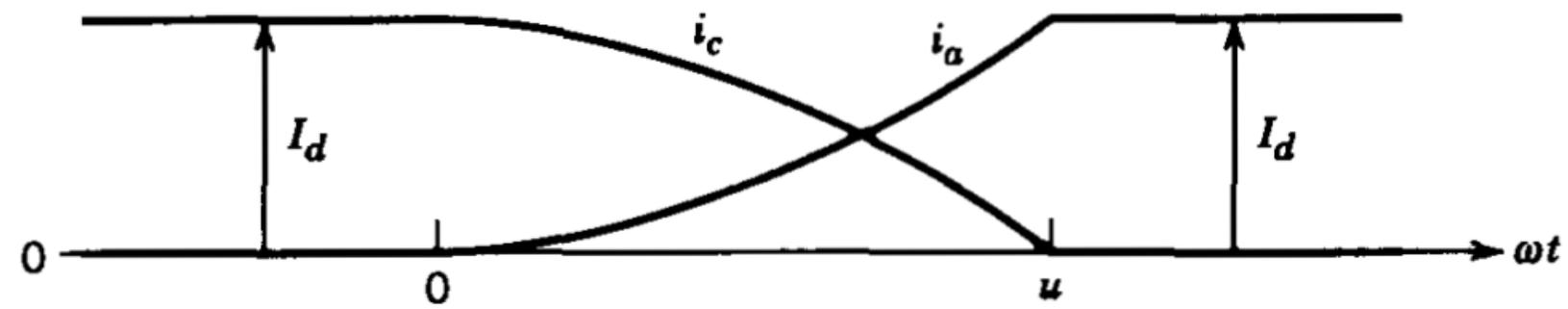
Corriente Plana

Una corriente aumenta y la otra disminuye

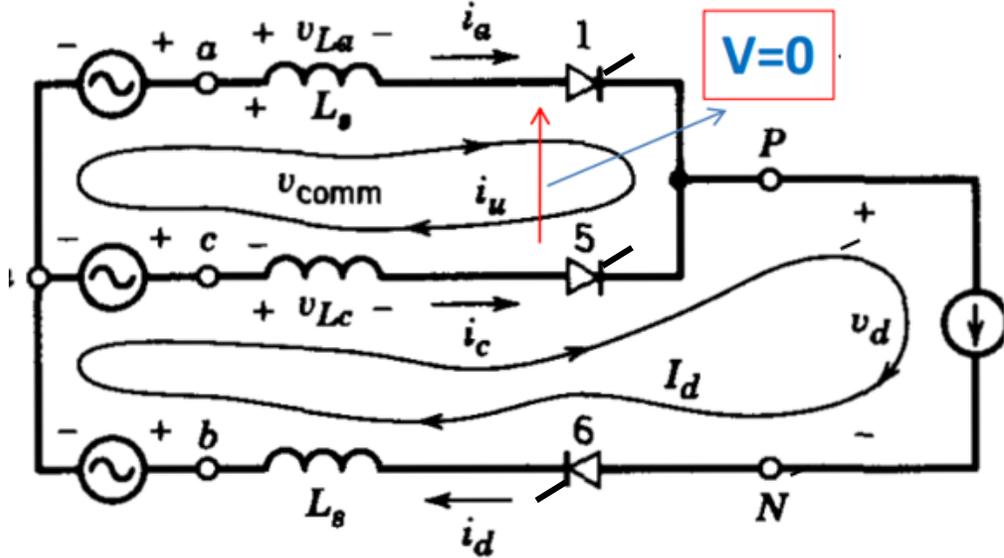
$$v_{an} - L_s \frac{di_u}{dt} = v_{cn} + L_s \frac{di_u}{dt}$$

$$2L_s \frac{di_u}{dt} = v_{an} - v_{cn}$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} = \frac{v_{an} - v_{cn}}{2}$$



Problema de la conmutación



$$v_{an} - L_s \frac{di_u}{dt} = v_{cn} + L_s \frac{di_u}{dt}$$

$$2L_s \frac{di_u}{dt} = v_{an} - v_{cn}$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} = \frac{v_{an} - v_{cn}}{2}$$

Por lo tanto la tensión del punto P que ve la carga durante la conmutación es:

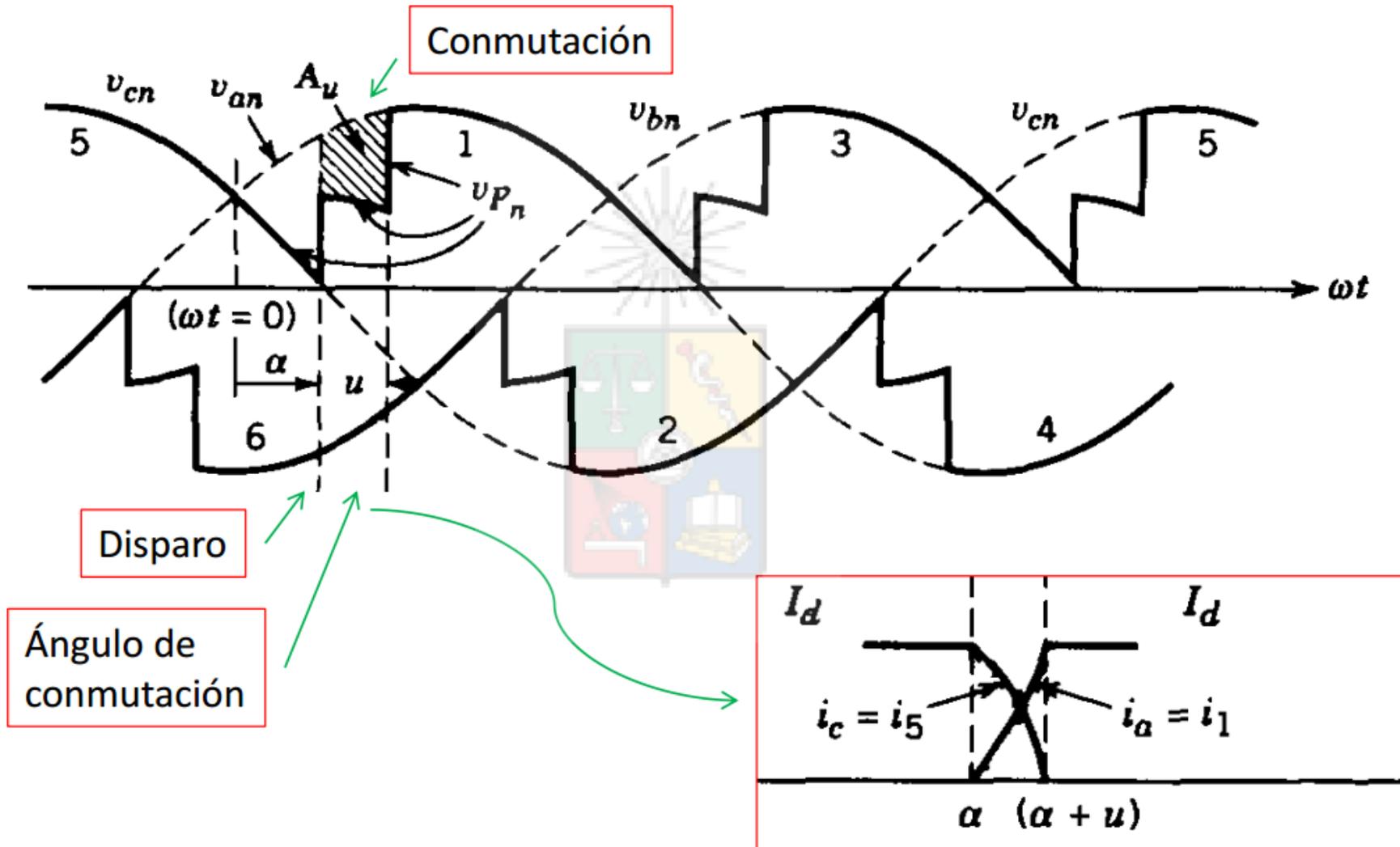
$$v_{an} - L_s \frac{di_a}{dt} = v_{an} - \left[\frac{v_{an} - v_{cn}}{2} \right]$$

Finalmente:

$$V_P = \left[\frac{v_{an} + v_{cn}}{2} \right]$$



Problemas de conmutación



Con un poco de pirotecnia matemática se puede demostrar (ver Mohan and Undeland capítulo 5) que la conmutación produce una pérdida de voltaje medio a la salida que es:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha - \frac{3\omega L_s}{\pi} I_d$$

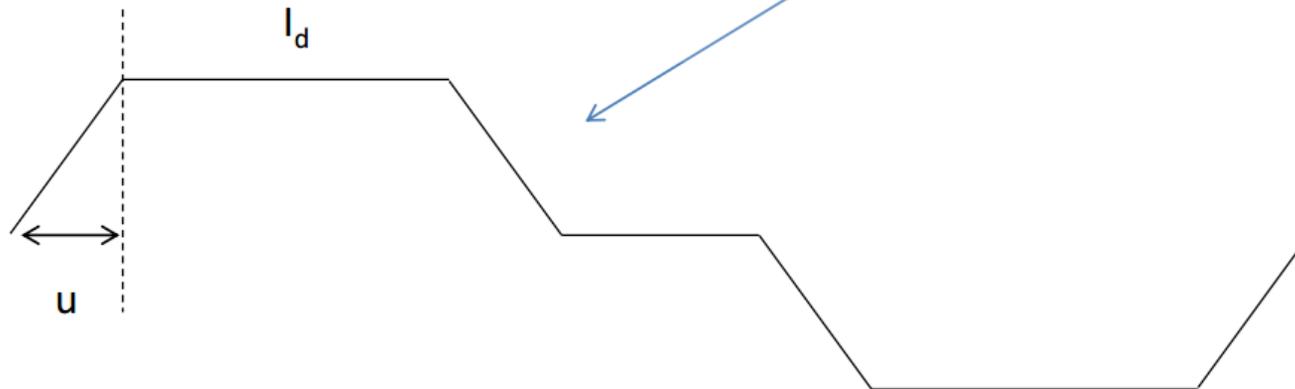
Pérdida de voltaje por conmutación

Tensión media de salida, incluyendo caída de voltaje por conmutación.

Voltaje medio sin conmutación debido a L_s

$$\text{DPF} \approx \cos \left(\alpha + \frac{1}{2}u \right)$$

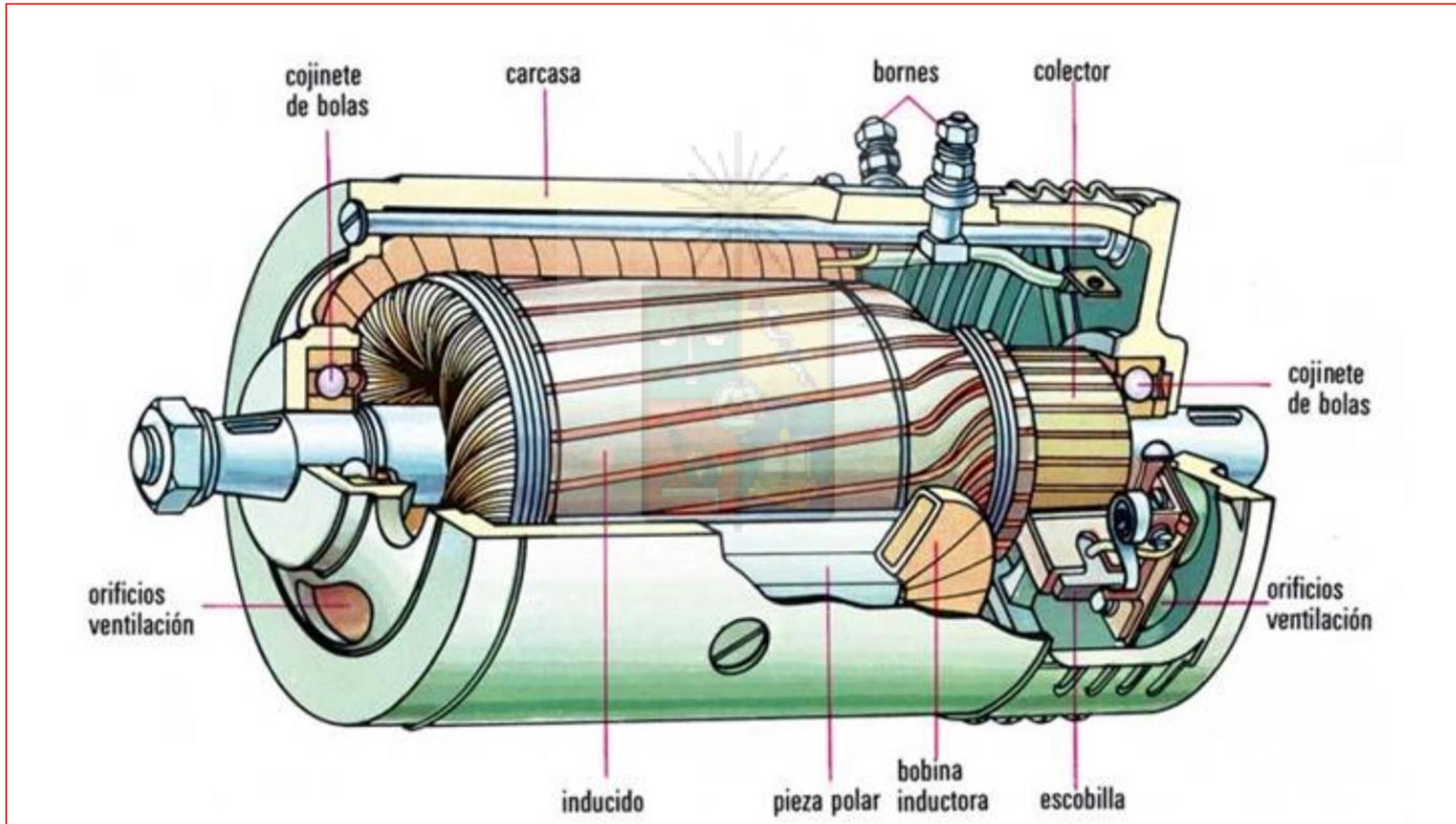
Factor de desplazamiento aproximado asumiendo corriente trapezoidal en la entrada.



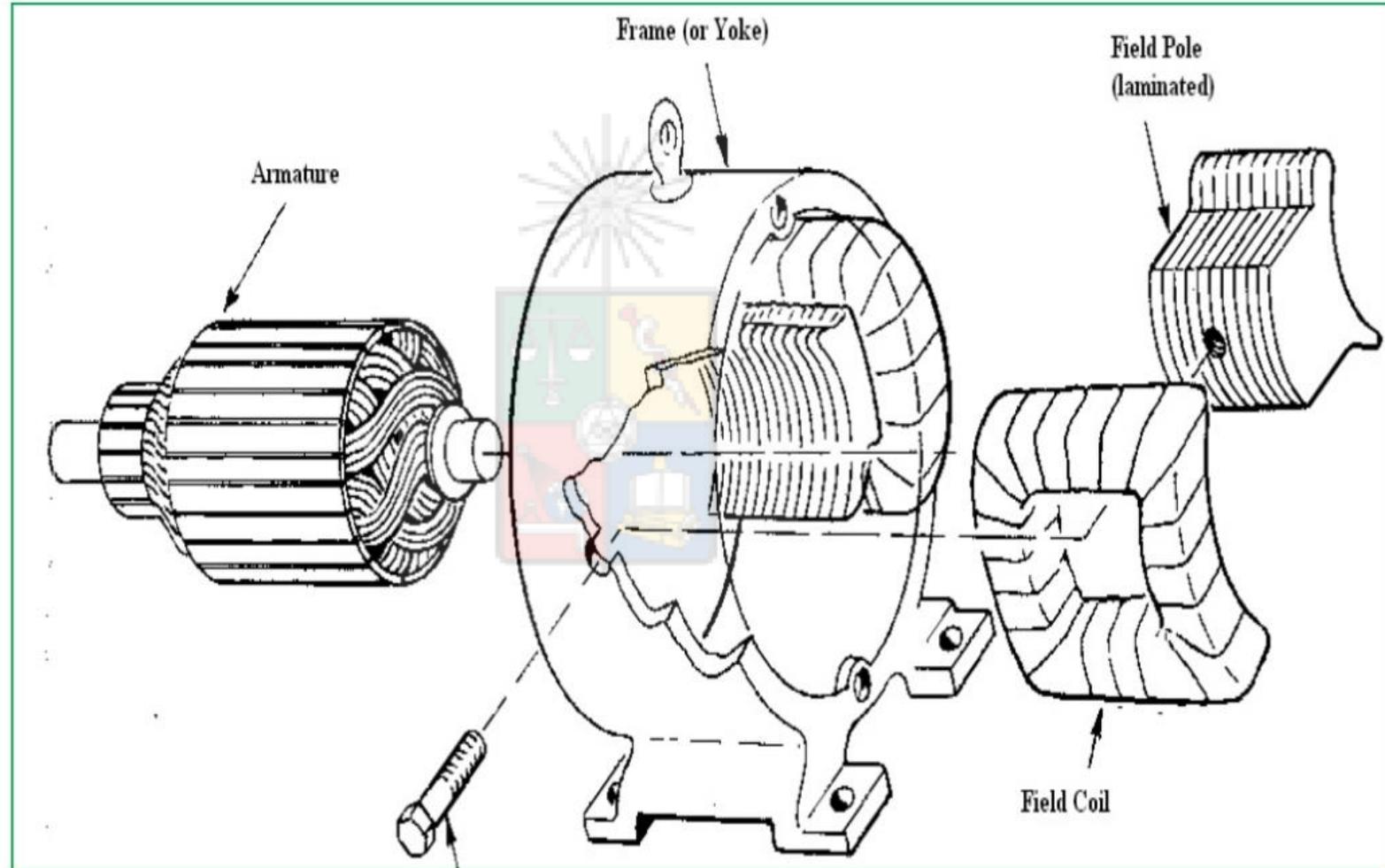
Máquina de Corriente Continua



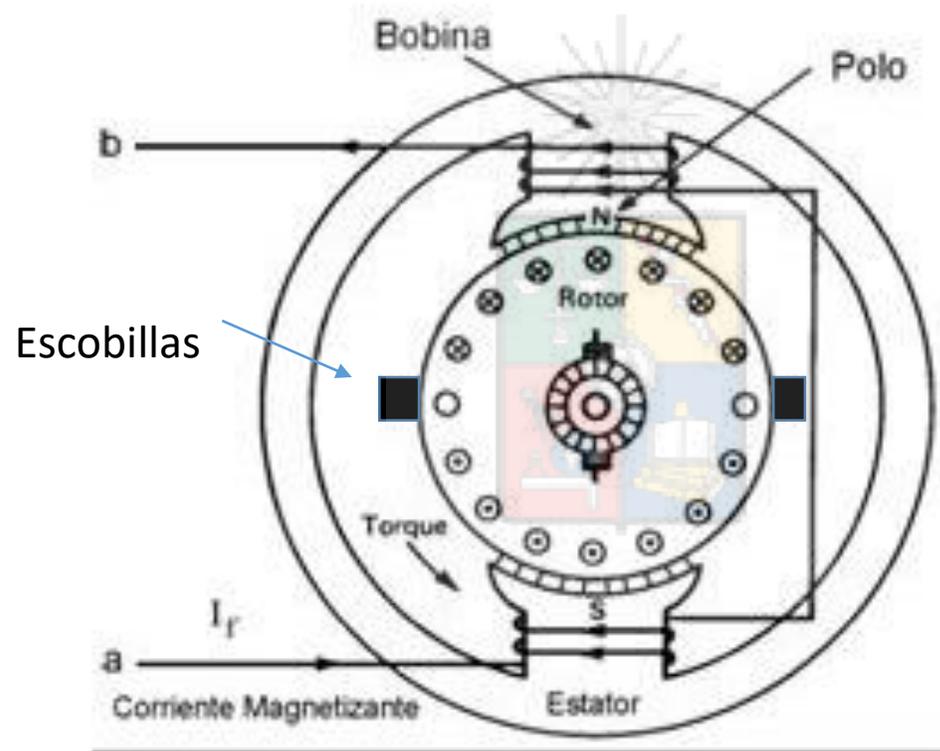
Componentes Constructivos



Componentes Constructivos Típicos

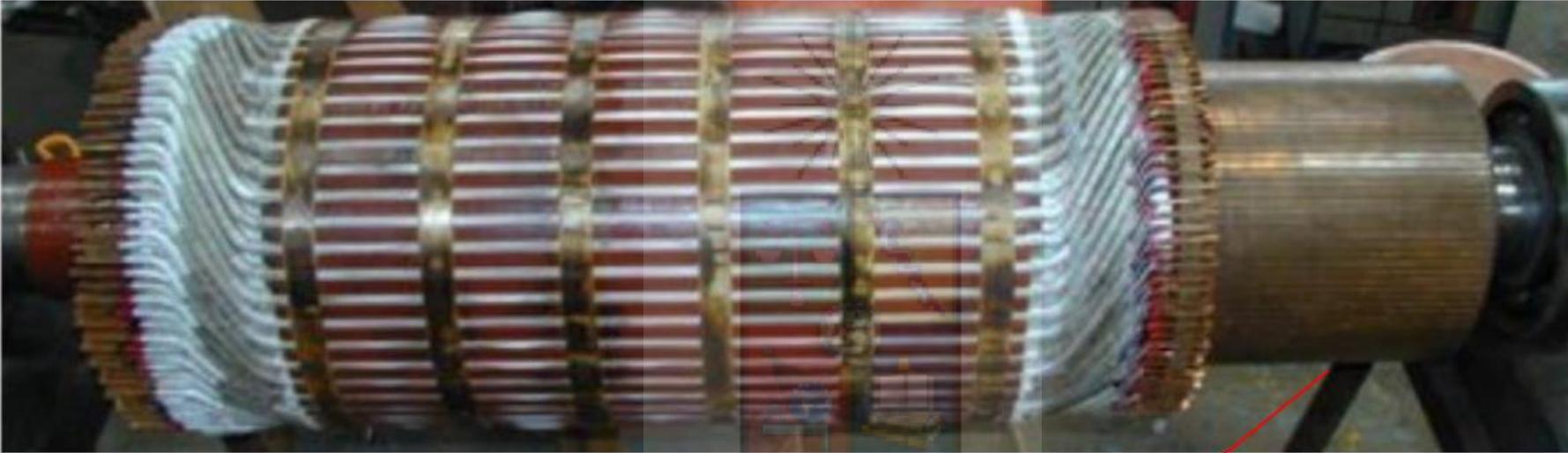


Generación de Torque



$$dT = i \underline{dl} \times \underline{B}$$

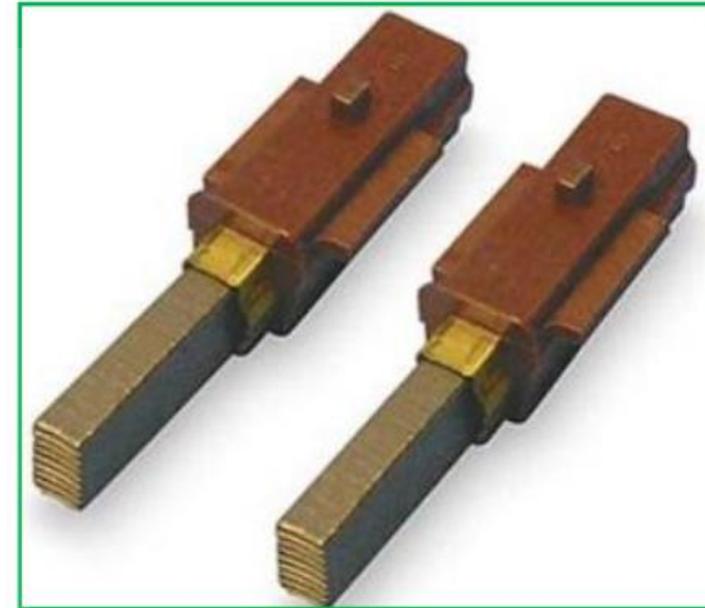
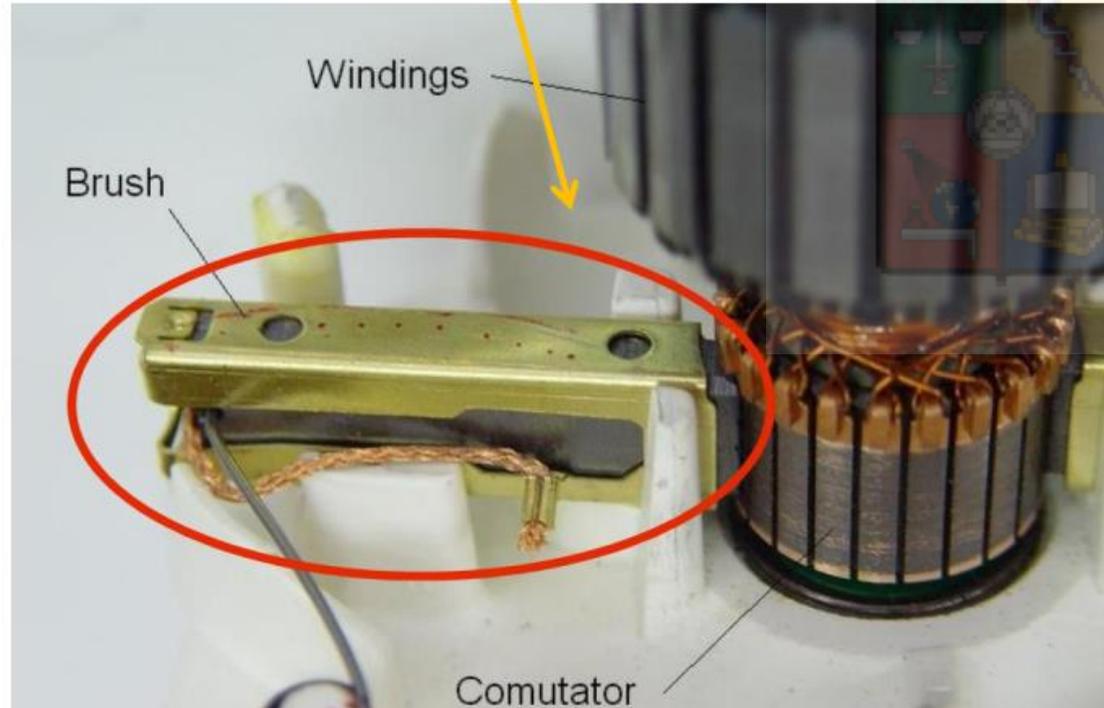
Rotor de una Máquina



Colector de la máquina
una de las fuentes de problemas

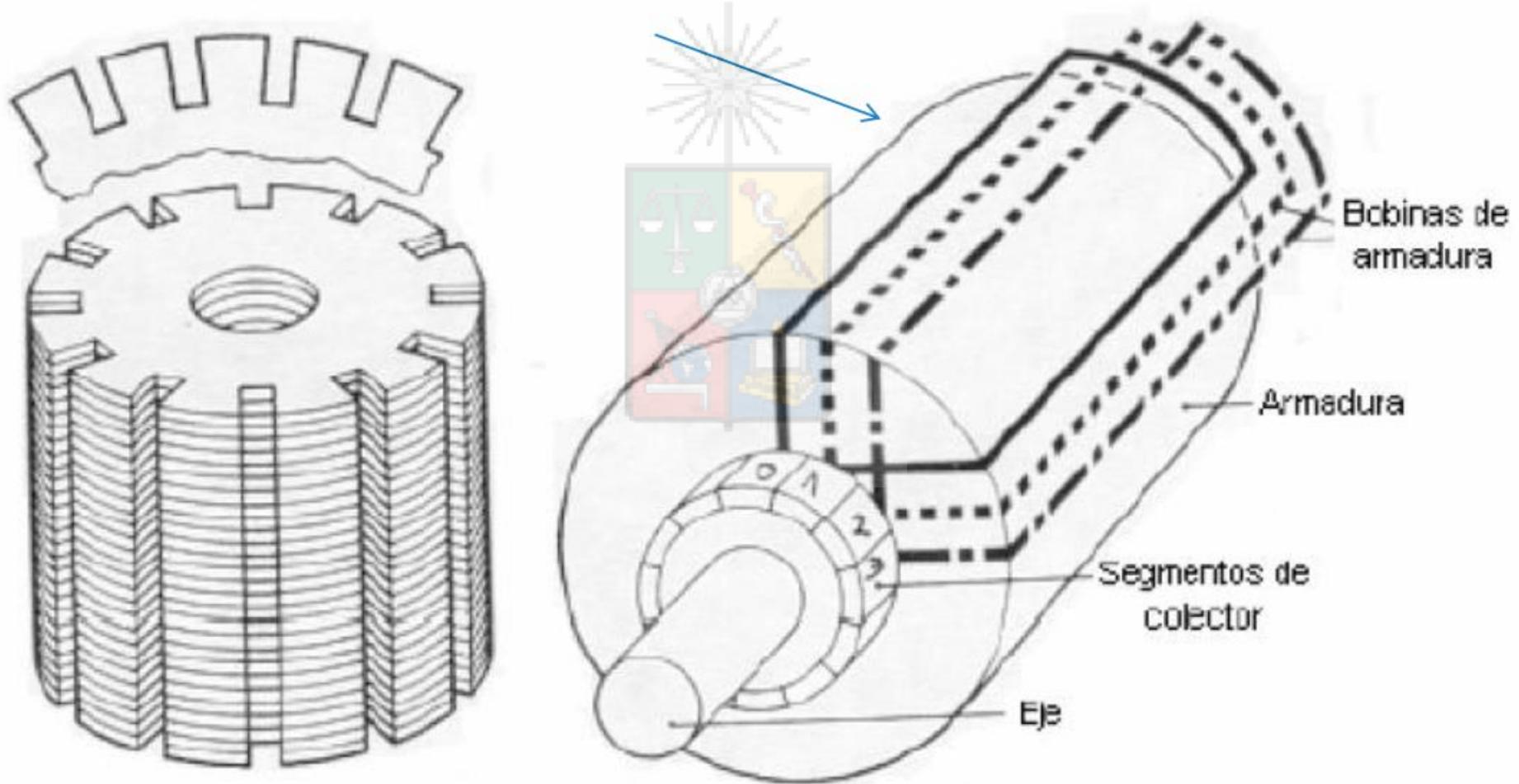
Escobillas

Otra causa de problemas
De mantenimiento.



Rotor

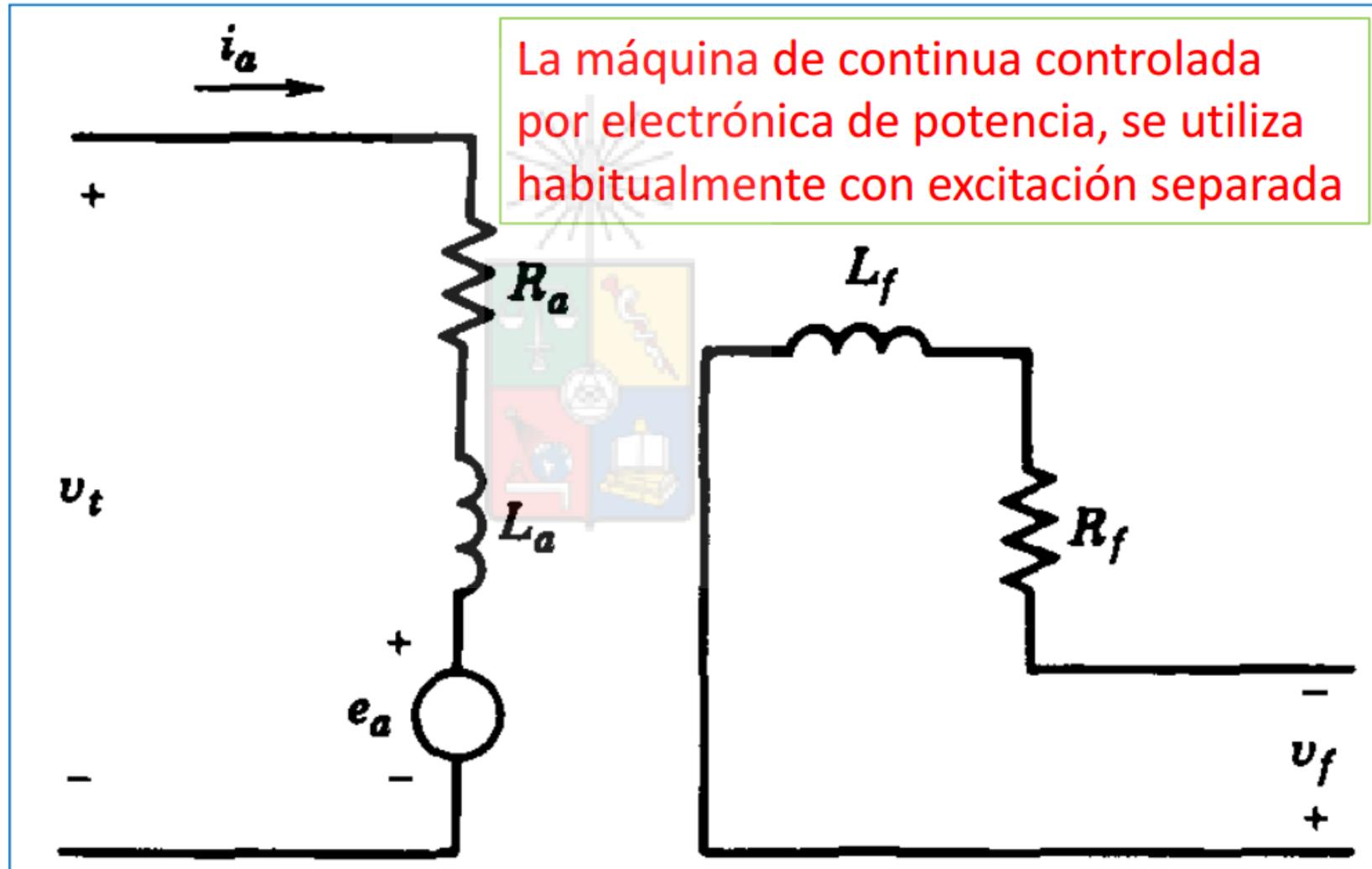
Los devanados del rotor pueden dificultar el uso de La máquina en altas velocidades rotacionales.



Ecuaciones dinámicas de la Máquina de Corriente Continua



Ecuaciones Dinámicas



Ecuaciones Dinámicas

Voltaje aplicado por el actuador

$$e_a = K \phi \omega_r \quad \text{Contrafuerza electromotriz}$$

$$K_T = K \phi$$

$$v_t = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_T \omega_r$$

$$T_e = K_T i_a$$

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r$$

E

M

Eje rígido. Esta es solo una de las posibles ecuaciones de carga mecánica

Si se baja el flujo baja el torque por ampere de armadura en la máquina.
(Torque/amp)

Ecuaciones Dinámicas

- Donde K es una constante que depende de aspectos constructivos del motor y ϕ es el flujo de operación.
- R_a y L_a son la resistencia e inductancia de los devanados.
- ω_r es la resistencia rotacional.
- J y B son la inercia rotacional y el coeficiente de fricción respectivamente.



Constantes de Tiempo

- En general, en todas las máquinas eléctricas, la constante de tiempo de la puerta mecánica es bastante mayor a la constante de tiempo eléctrica de armadura.

$$\frac{J}{B} \gg \frac{L_a}{R_a}$$

- En servomotores el valor de J/B es menor y esto puede afectar el diseño de los sistemas de control.

Constantes de Tiempo

- No todas las constantes de tiempo eléctricas son bajas. El devanado de excitación tiene un alto valor inductivo y en una máquina típica no es posible cambiar rápidamente la corriente de excitación.

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

$$\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$$

Control de la máquina de continua

- En todas las máquinas eléctricas existen dos modos de control:

- A flujo nominal. En este caso se puede obtener torque nominal si es necesario. Sin embargo no se puede aumentar la velocidad mas allá de la “velocidad base”.

$$v_t = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_T \omega_r$$

- Si ω_r es mayor a la velocidad base, entonces la contrafuerza electromotriz es mayor al voltaje v_t

Control a flujo Debilitado

- Como se definió anteriormente, $K_T = K\phi$. Por lo tanto al reducir el flujo, controlando la corriente de campo i_f , el valor de K_T disminuye

$$v_t = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K\phi\omega_r$$

$$\phi = \phi_{no\ min} \text{ al } \frac{\omega_{base}}{\omega_r} \quad \omega_r > \omega_{base}$$

$$\phi = \phi_{ni\ min} \text{ al } \quad \omega_r \leq \omega_{base}$$

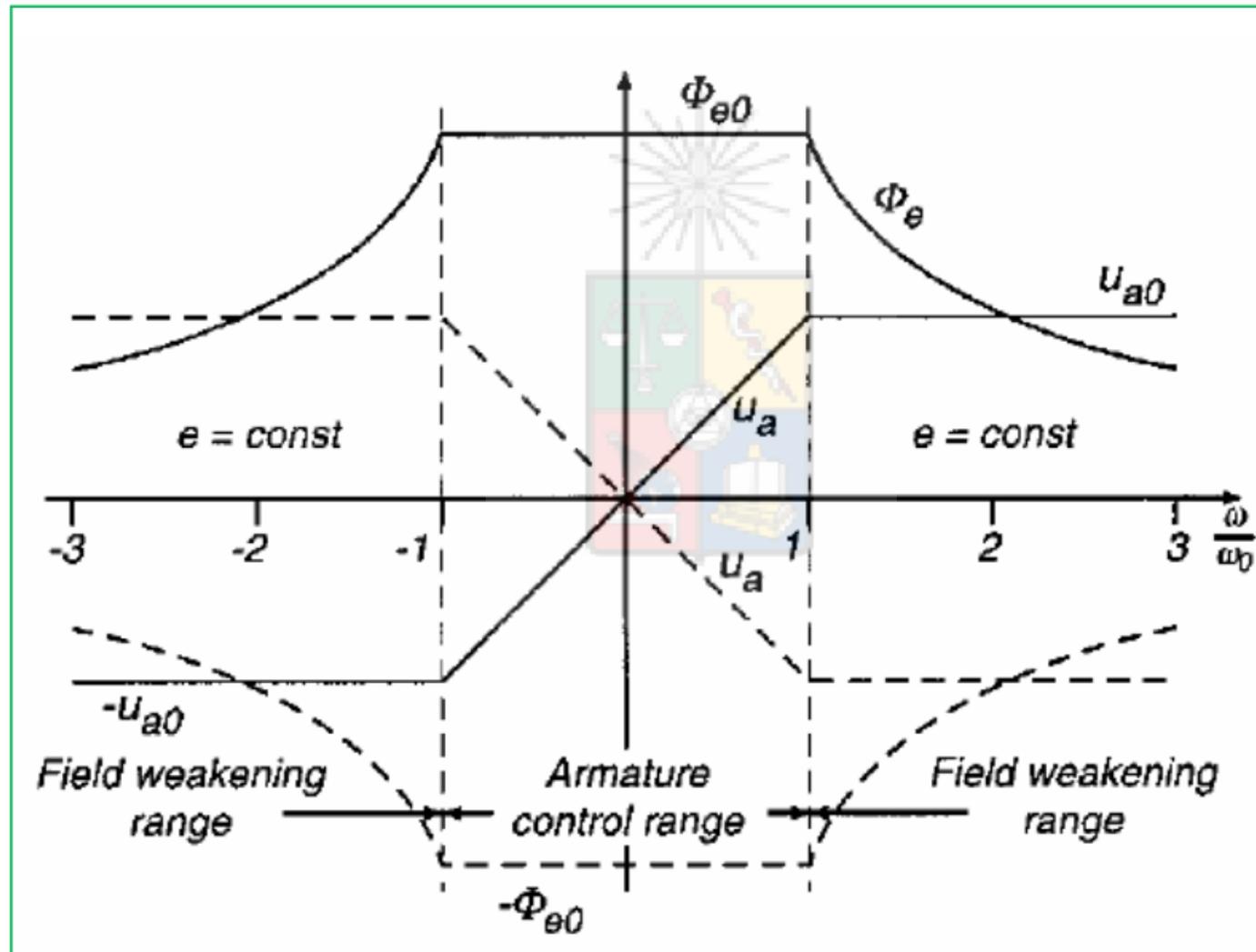


Control a flujo Debilitado

- Al bajar el flujo de la máquina, ya no es posible obtener torque nominal sin sobrepasar la corriente nominal de armadura. Sin embargo es posible obtener potencia nominal.

$$T = K\phi i_a$$

Flujo Nominal y Flujo Debilitado



Lazos de Control

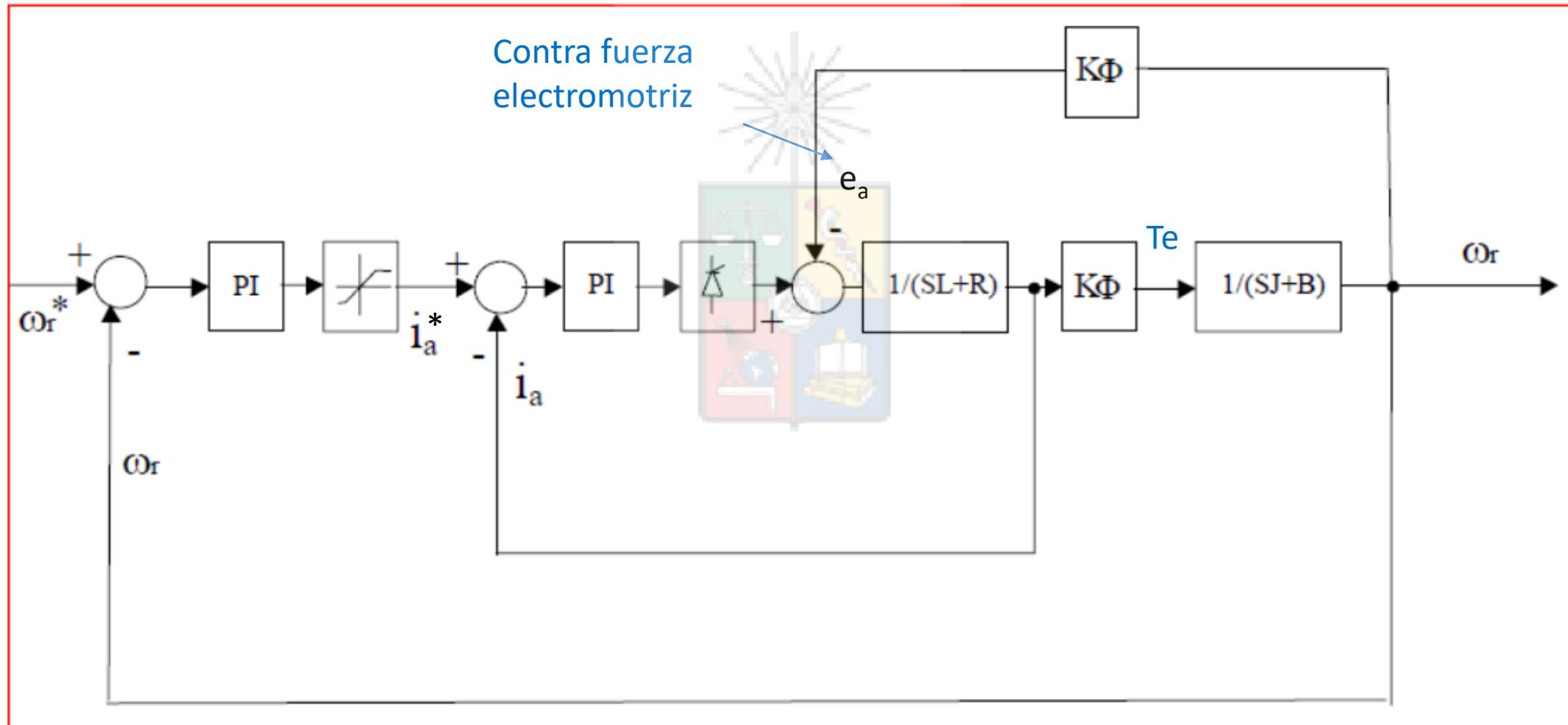
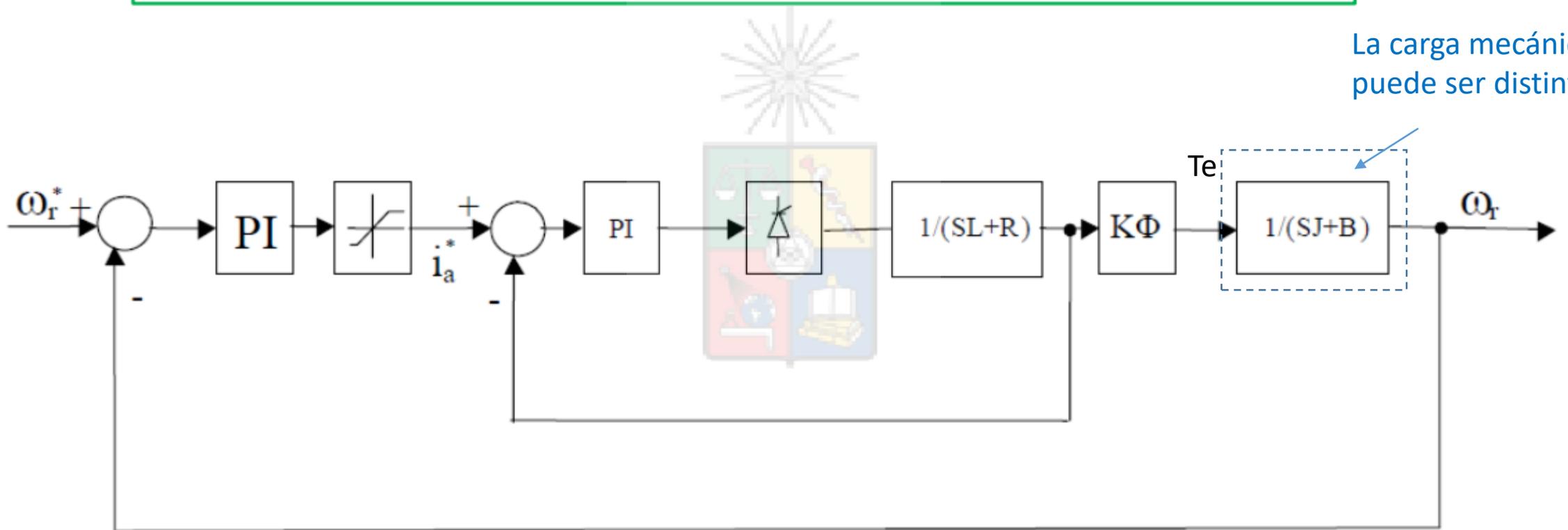


Diagrama Simplificado

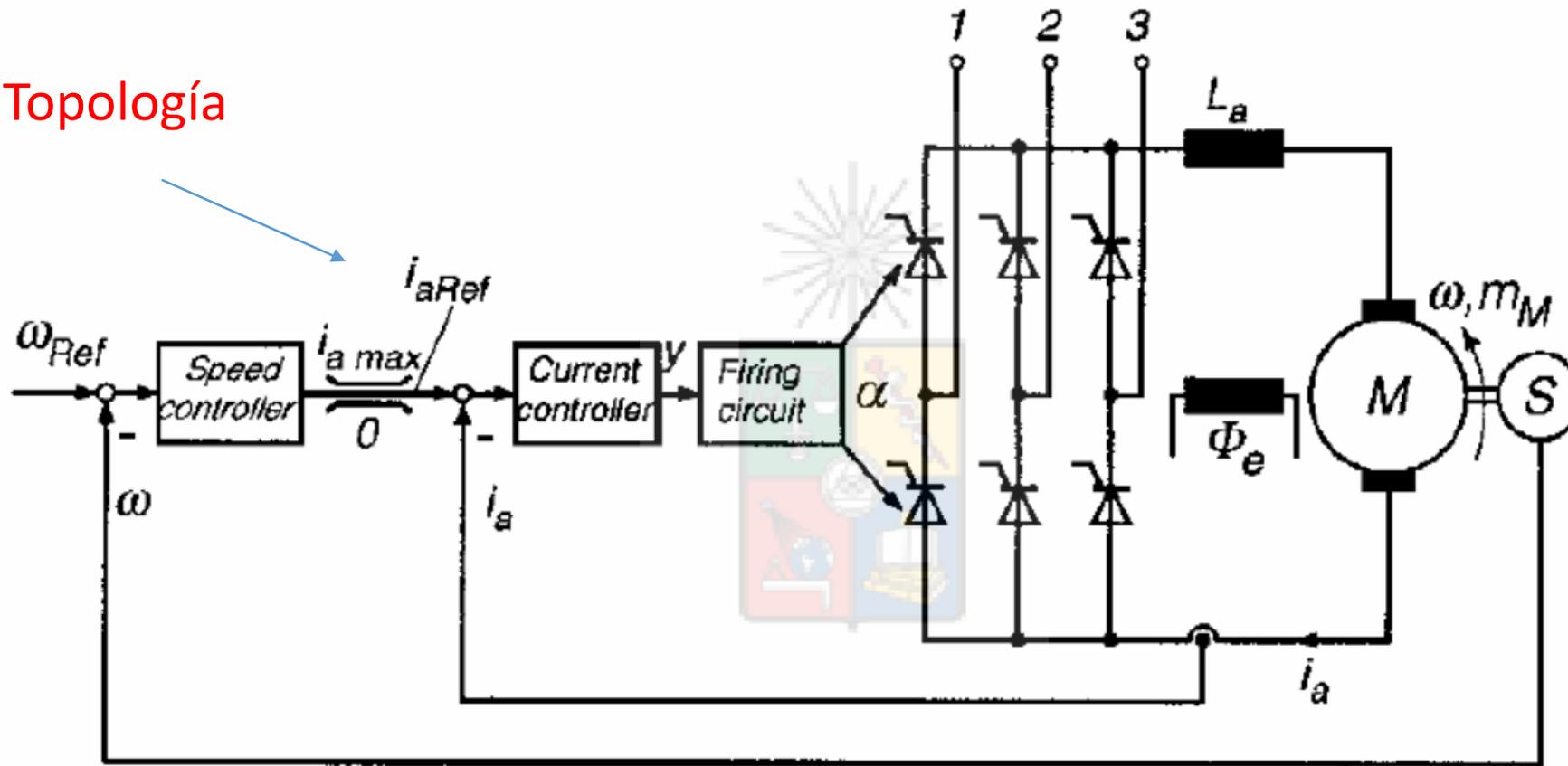


La carga mecánica puede ser distinta



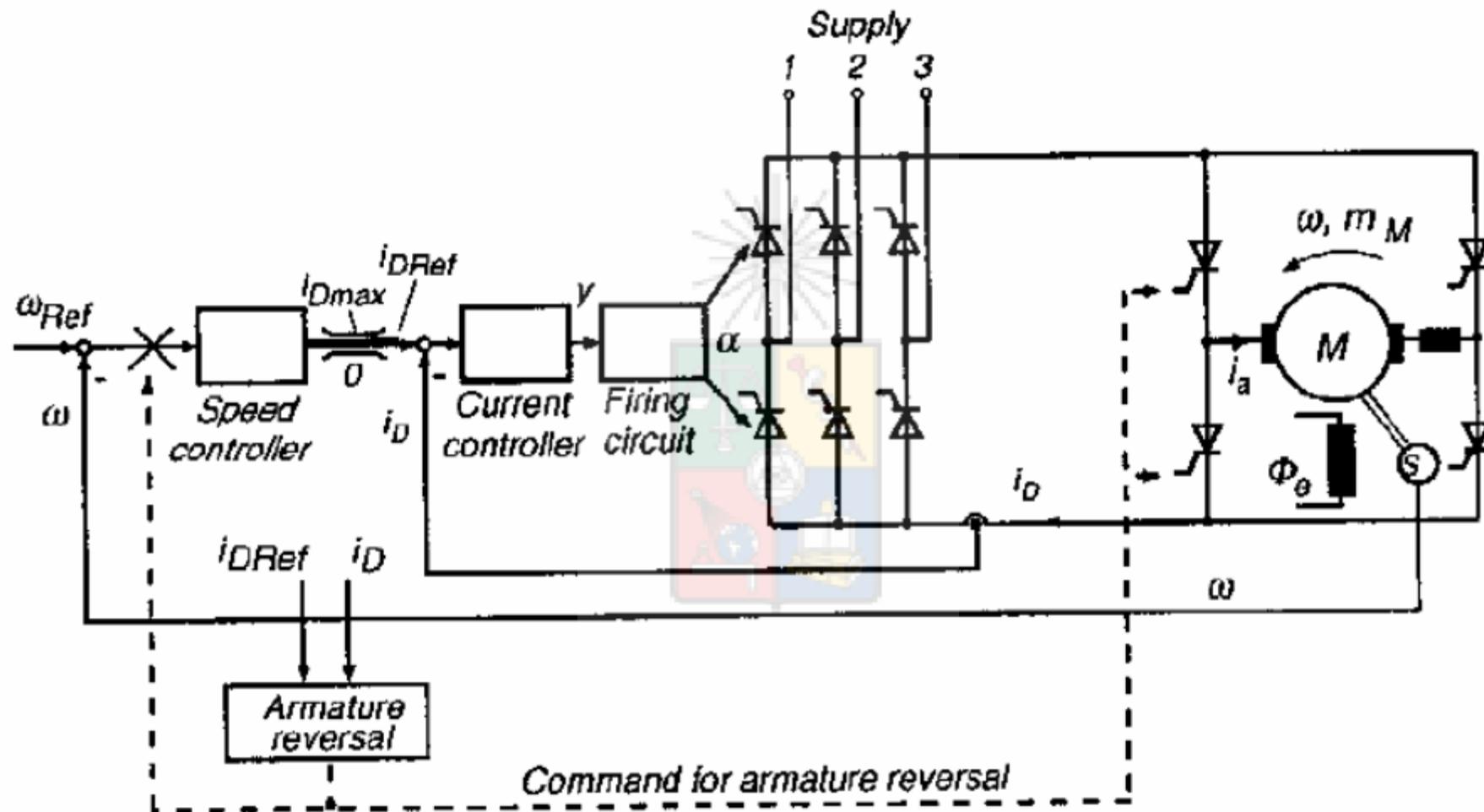
Control Utilizando Conversores de Conmutación Natural

Primera Topología



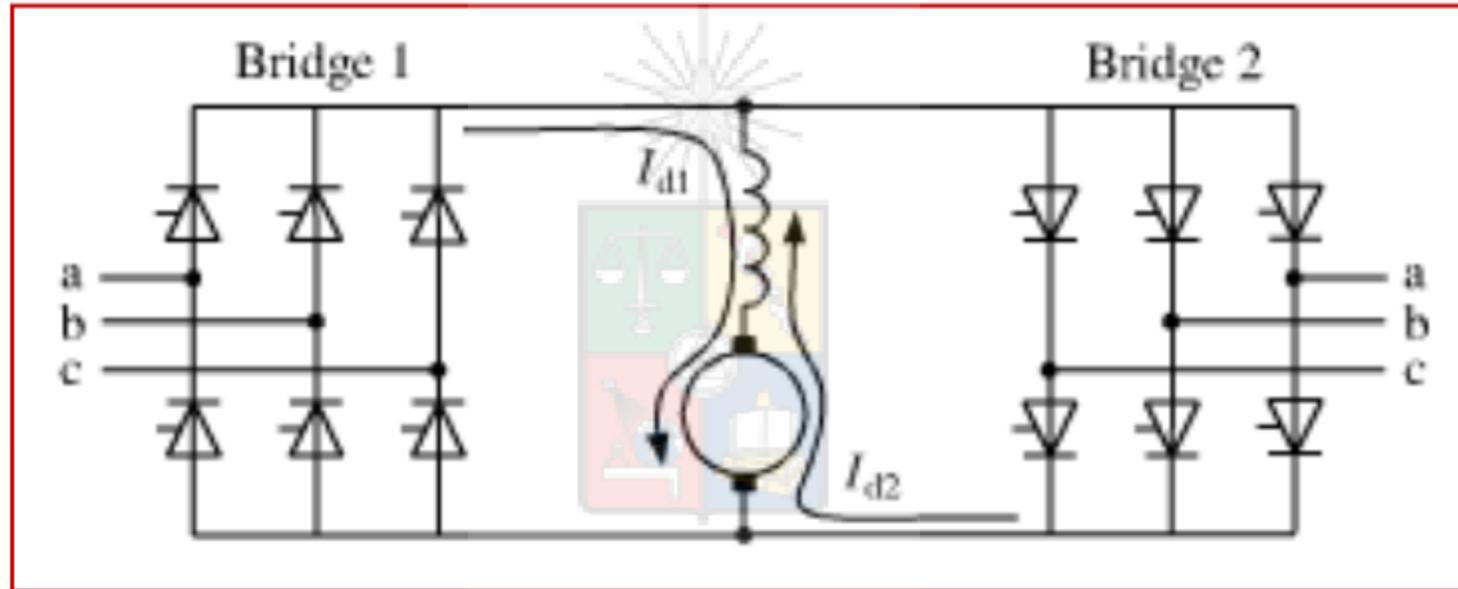
No es posible cambiar el sentido del torque a menos que se cambie la dirección del flujo, lo cual no permite altas velocidades de respuesta.

Control en cuatro cuadrantes



Es posible cambiar el sentido de la corriente de armadura. Necesita cuatro tiristores que soporten la corriente nominal.

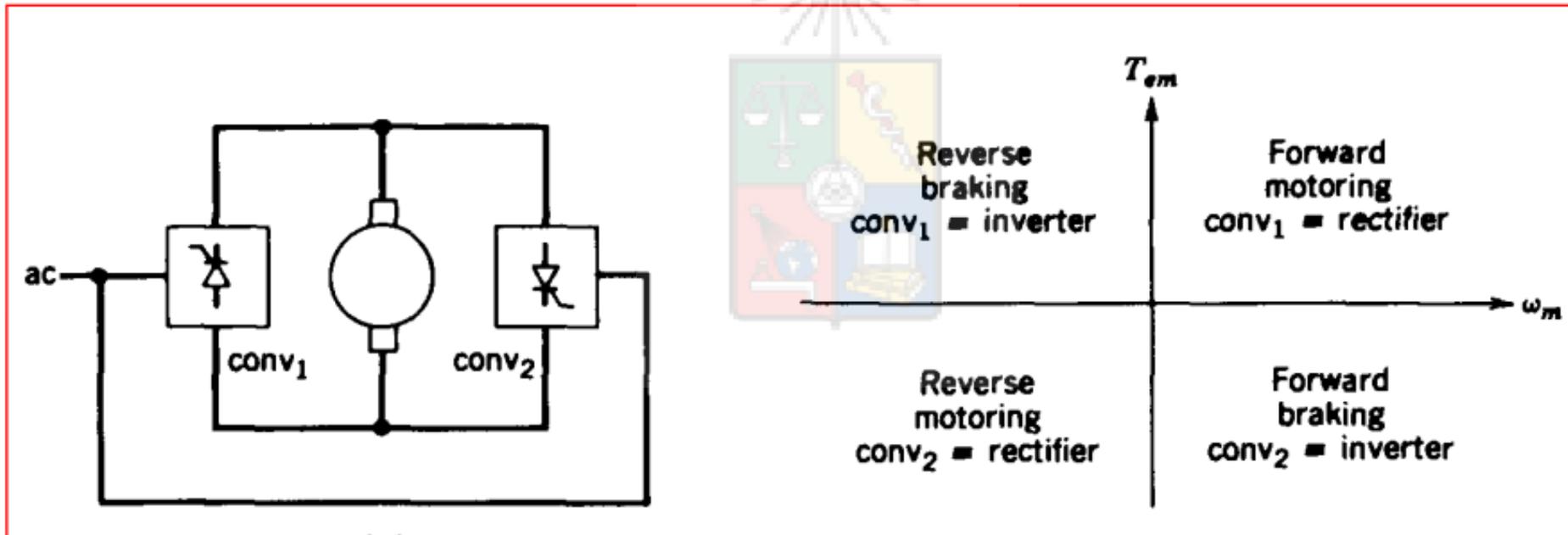
Otro Esquema de Control En Cuatro Cuadrantes



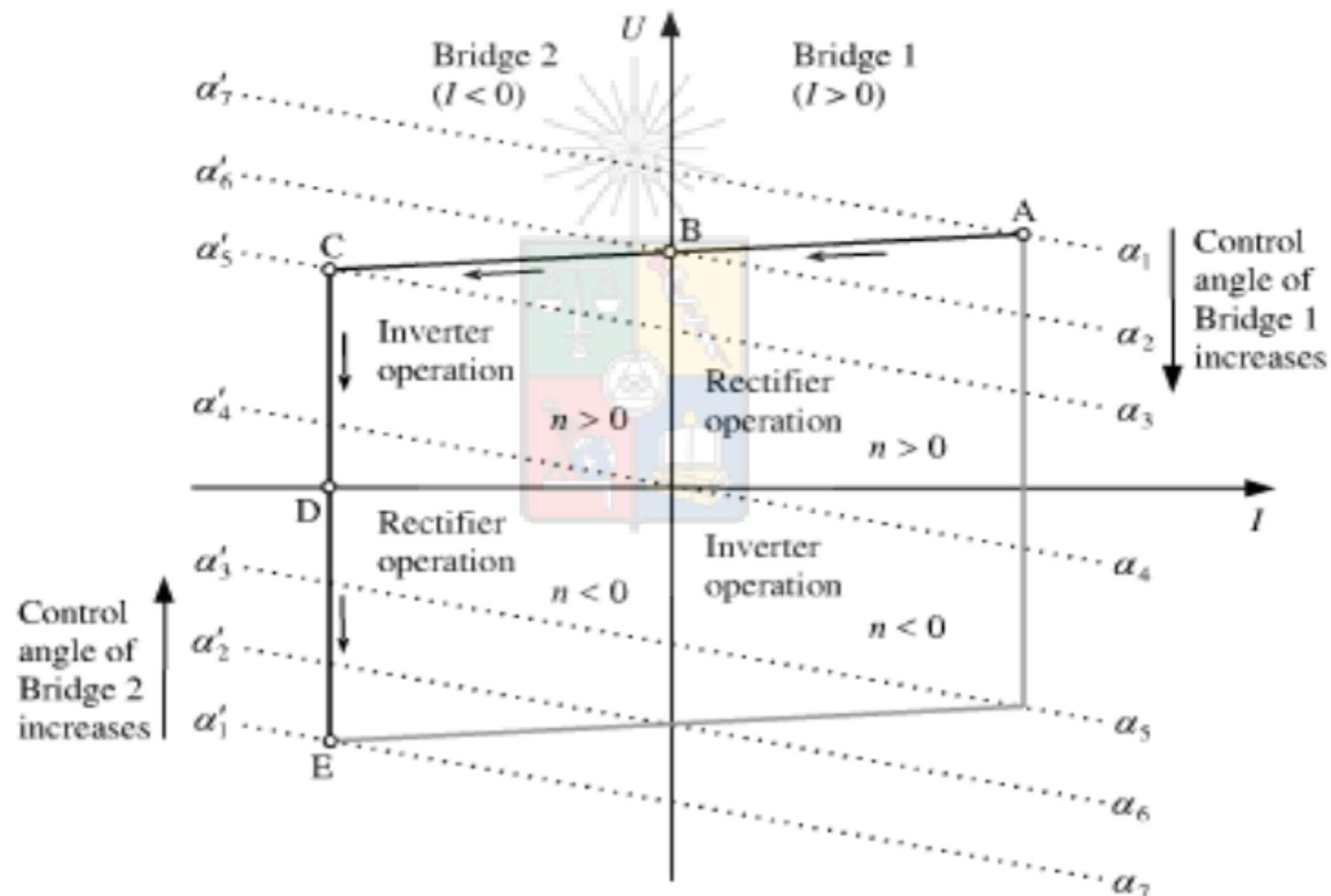
Necesita 6 tiristores adicionales, pero cada uno de ellos transporta solo una fracción de la corriente.



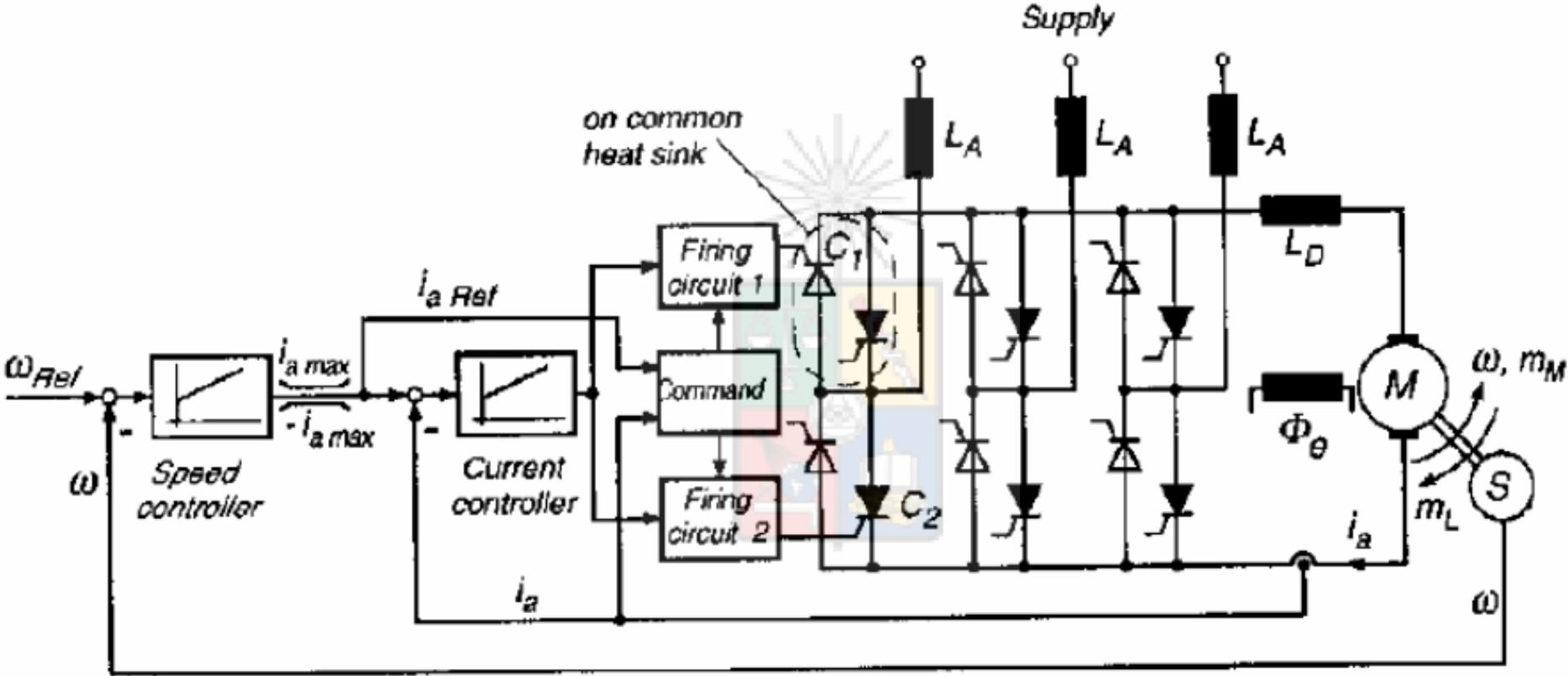
Control en cuatro cuadrantes



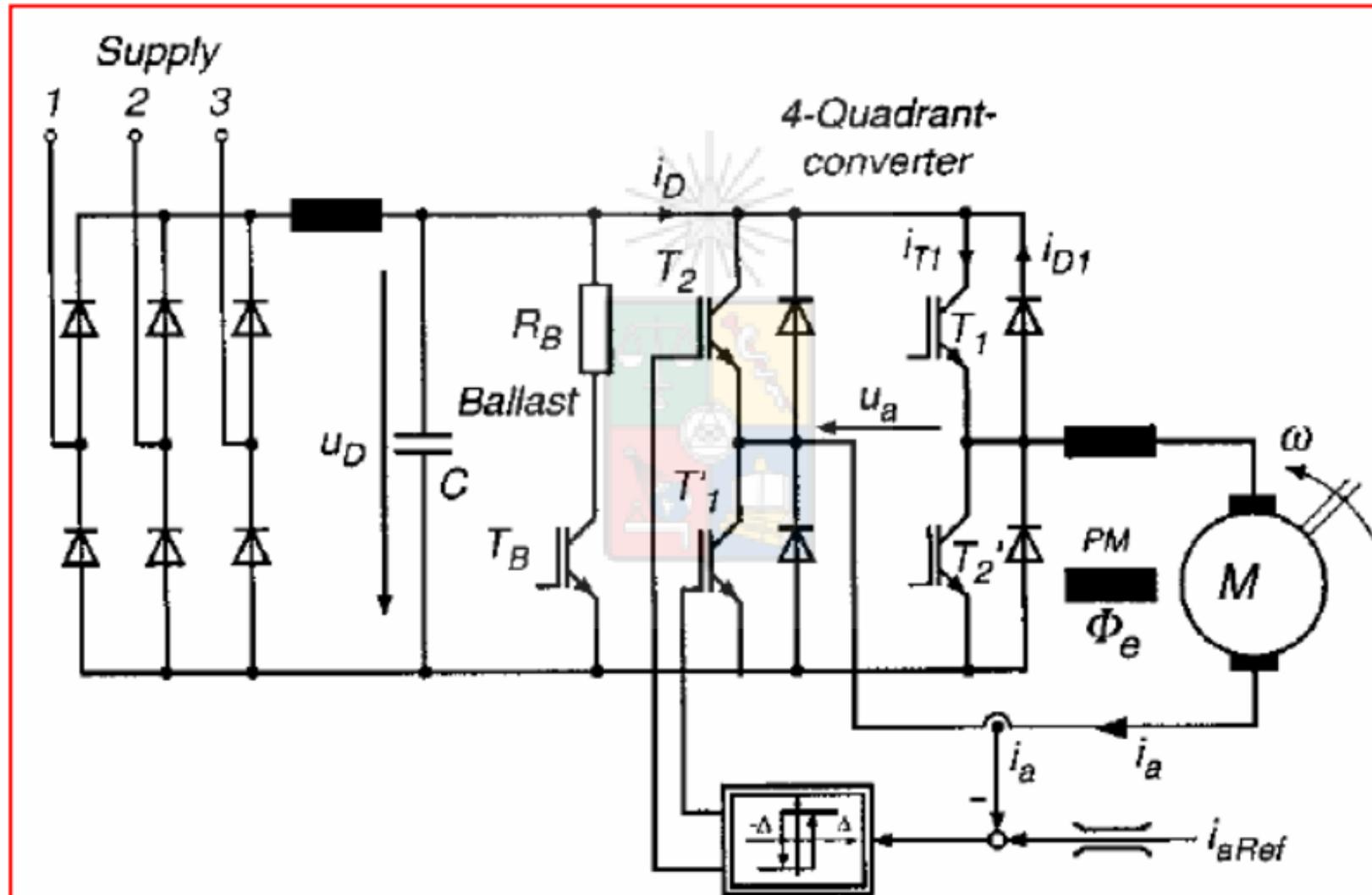
Control en cuatro cuadrantes



Control Utilizando conversores basados en Tiristores en conexión Back to Back



Conversores de Conmutación Forzada



Las diapositivas son solo una parte del material del curso. Por favor consulten y utilicen la bibliografía recomendada.

¡Estudien!