



***Universidad de Oviedo***

# **Tema VI: La máquina de corriente continua**

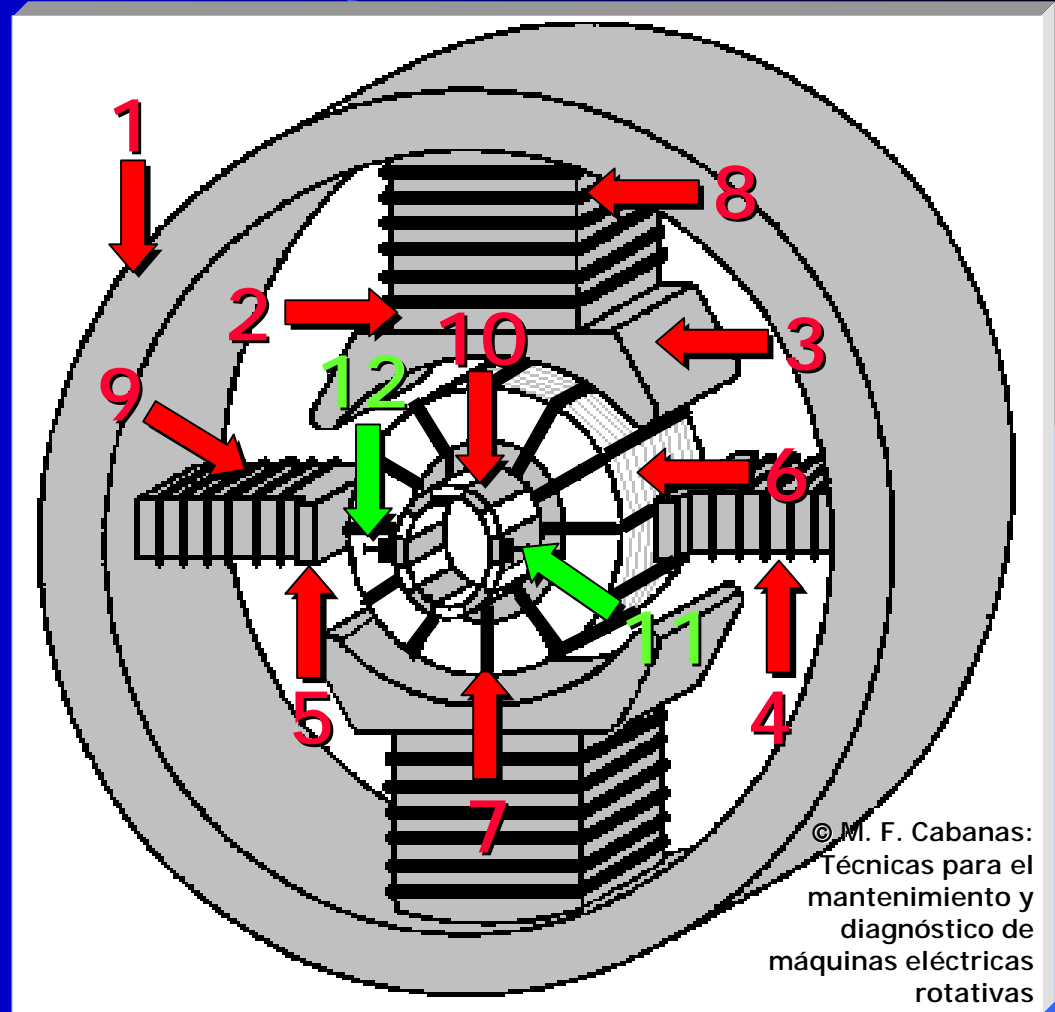
***Dpto. de Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica de Computadores y  
Sistemas***

# 6.1. La máquina de CC: generalidades

- La máquina de CC consta de dos devanados alimentados con CC: uno llamado inductor que está en el estator de la máquina y otro llamado inducido que está en el rotor.
- En el caso de funcionamiento como motor ambos devanados están alimentados con CC. En el caso de funcionamiento como generador se alimenta con CC el inducido y se obtiene la FEM por el inductor (también continua).
- Su funcionamiento se basa en la existencia de un mecanismo llamado colector que convierte las magnitudes variables generadas o aplicadas a la máquina en magnitudes constantes.
- Se utilizan en tracción eléctrica (tranvías, trenes etc.) y en accionamientos donde se precisa un control preciso de la velocidad.
- Están en desuso debido a su complejo mantenimiento.

## 6.2. Despiece de una máquina de CC

1. Culata
2. Núcleo polar
3. Expansión polar
4. Núcleo del polo auxiliar o de conmutación
5. Expansión del polo auxiliar o de conmutación
6. Núcleo del inducido
7. Arrollamiento de inducido
8. Arrollamiento de excitación
9. Arrollamiento de conmutación
10. Colector
11. – 12. Escobillas



© M. F. Cabanas:  
Técnicas para el  
mantenimiento y  
diagnóstico de  
máquinas eléctricas  
rotativas

# Motores de CC



Catálogos comerciales

Pequeños motores de CC e imanes permanentes

Motor de CC para aplicaciones de robótica



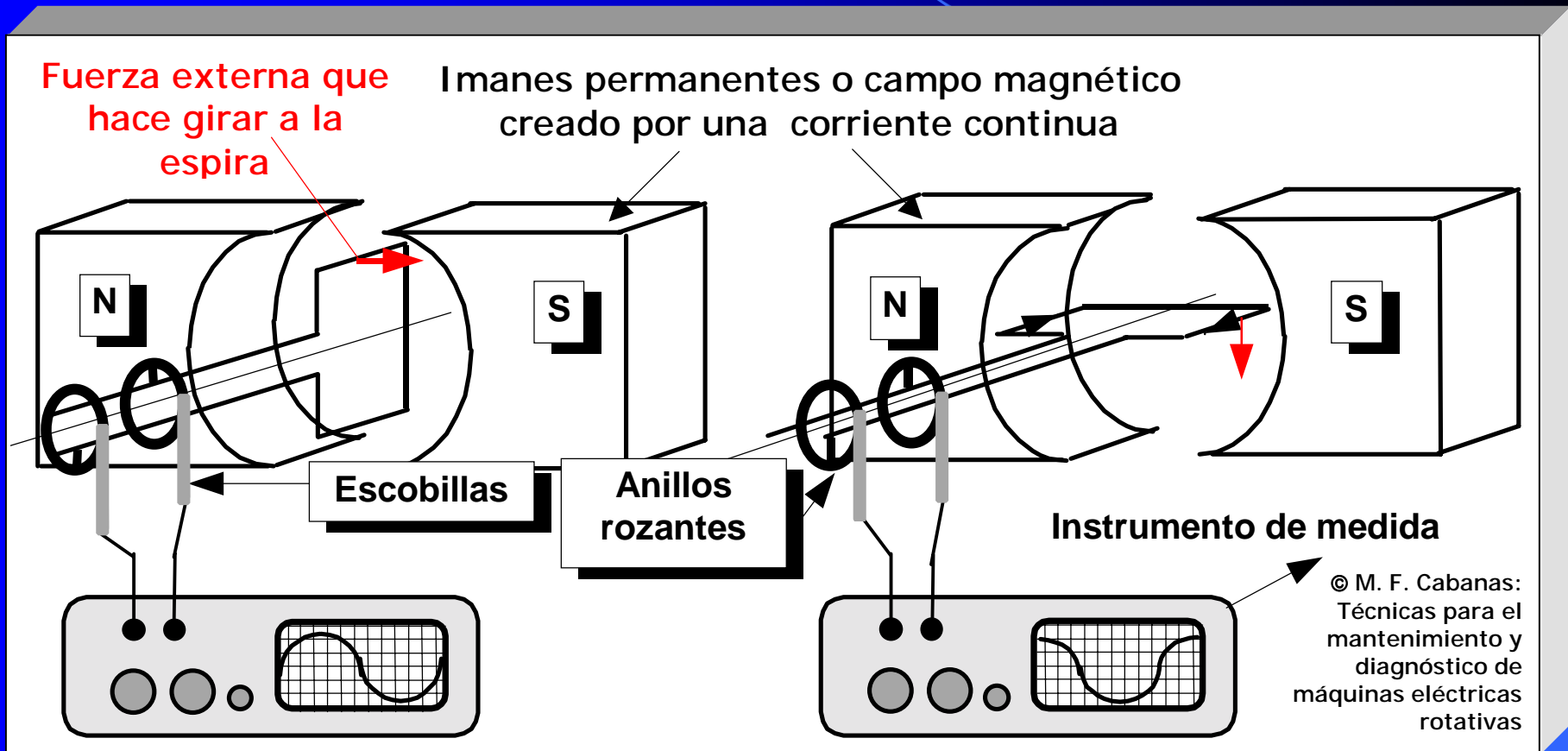
Motor de CC de 6000 kW fabricado por ABB



Catálogos comerciales



# 6.3. Funcionamiento como generador I



La FEM que se obtiene a la salida de la máquina varía en el tiempo ya que esta máquina no dispone de colector

# 6.3. Funcionamiento como generador II

$$d\phi = B \cdot d\text{area}$$

$$d\phi = B \cdot l \cdot r \cdot d\alpha$$

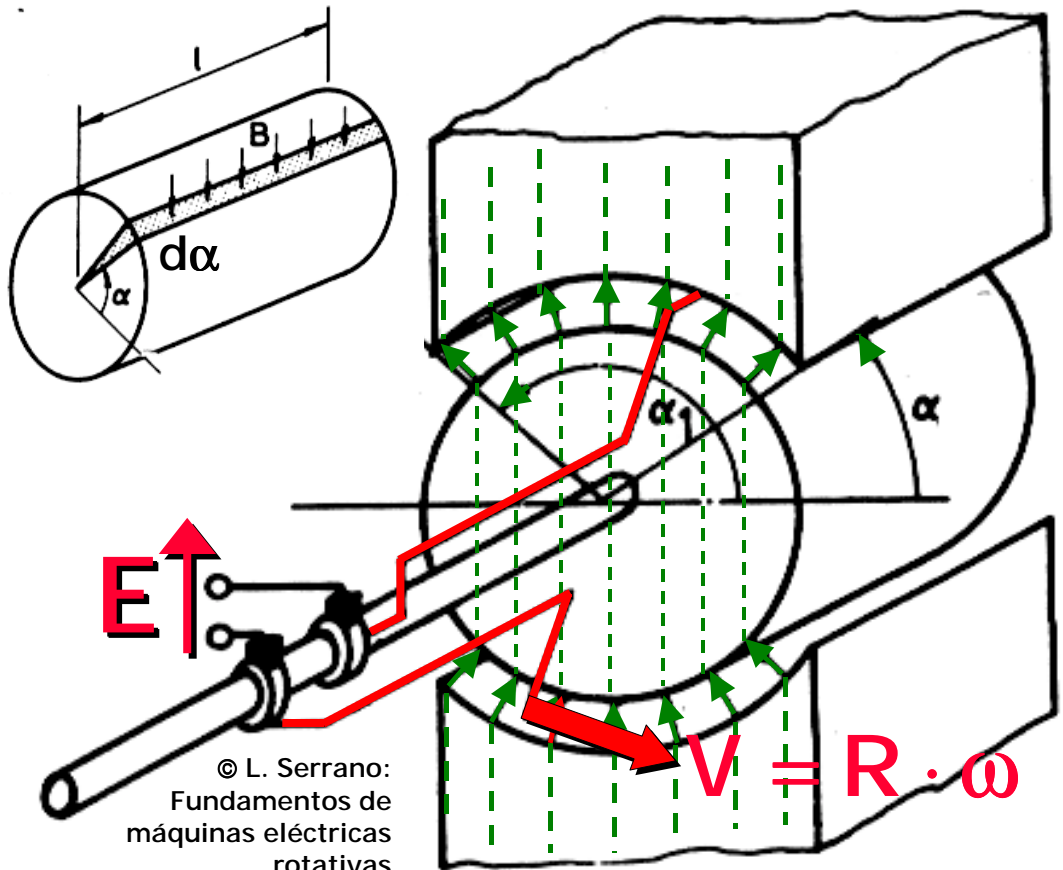
$$\phi = \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} B \cdot l \cdot r \cdot d\alpha$$

$$\phi = B \cdot l \cdot (\pi - 2\alpha)$$

Si la espira gira con velocidad angular  $\omega = d\alpha/dt$  mientras se mueva en la zona del flujo se inducirá en ella FEM:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} = -B \cdot l \cdot r \left( -2 \frac{d\alpha}{dt} \right)$$

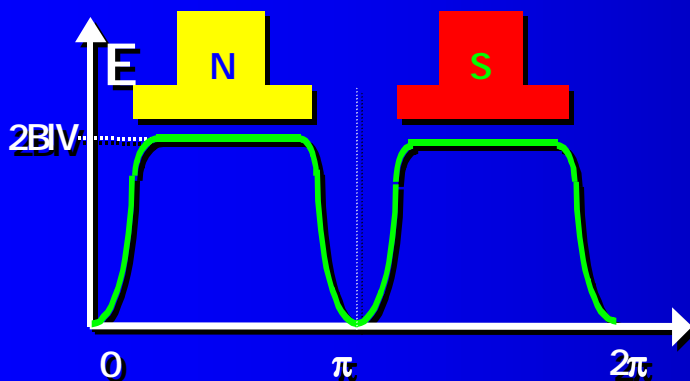
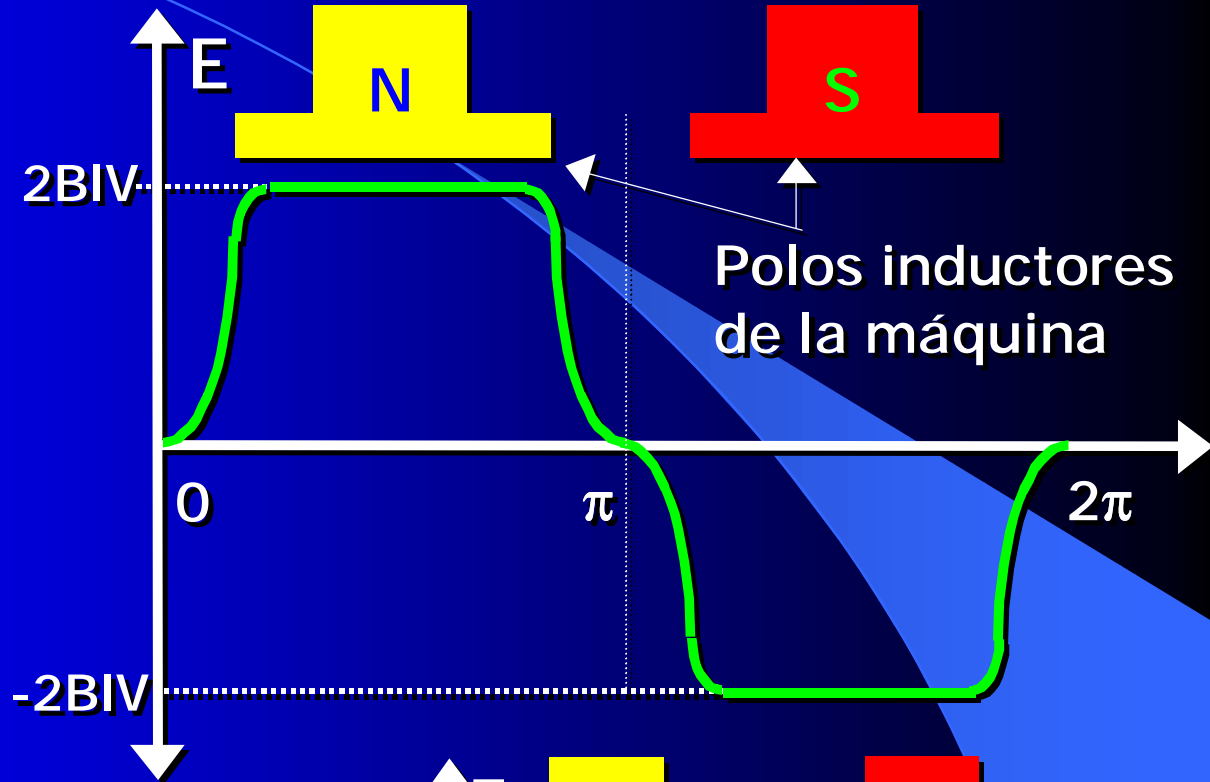
$$E = 2 \cdot B \cdot l \cdot V$$



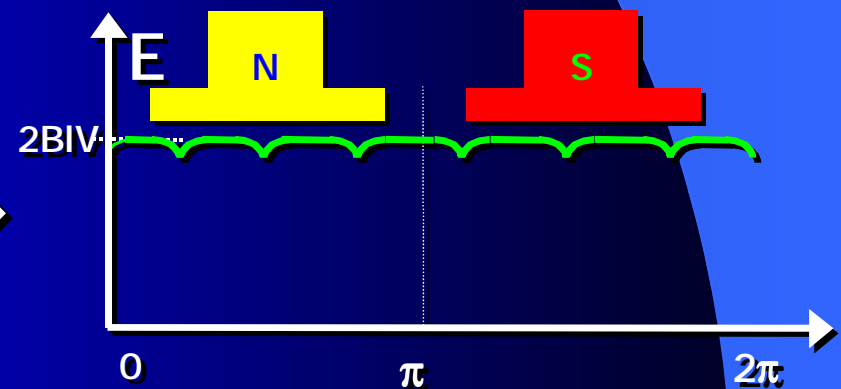
Con la máquina girando a una cierta velocidad  $V$ , la fem que se induce es alterna: cambia de signo cada vez que se pasa por debajo de cada polo.

El colector es un dispositivo que invierte el sentido de la FEM para obtener una tensión continua y positiva

$$E = 2 \cdot B \cdot I \cdot V$$



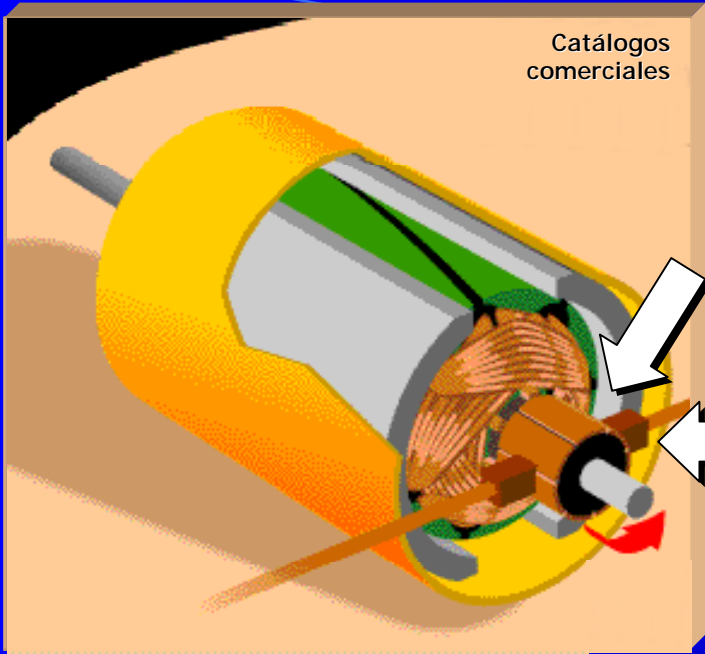
Colector elemental (2 delgas)



Colector real (muchas delgas)

# 6.4. El colector

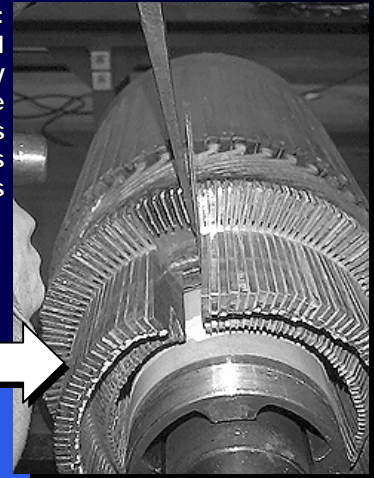
Catálogos comerciales



Colector

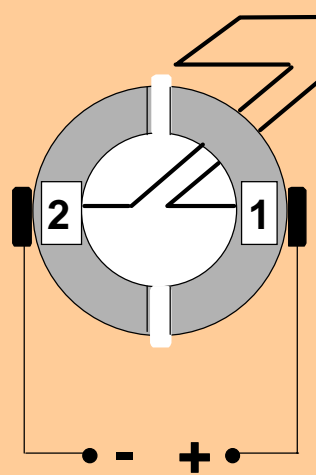
Escobillas

© M. F. Cabanas:  
Técnicas para el  
mantenimiento y  
diagnóstico de  
máquinas  
eléctricas  
rotativas

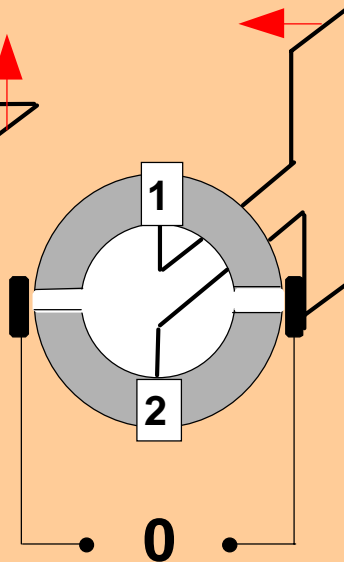


Colector  
real

Sentido de rotación  
de la espira

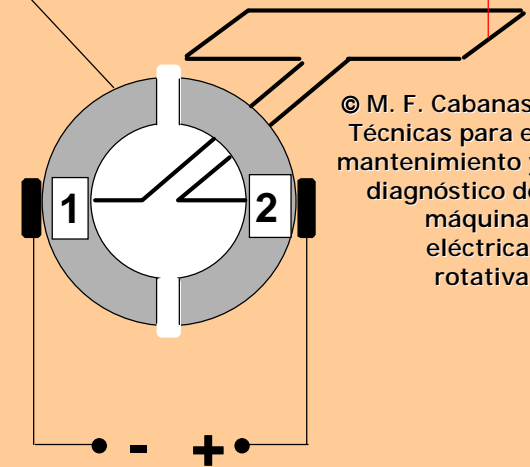


Instante Inicial



Conmutación

Colector de dos  
delgas



Inversión de la polaridad

© M. F. Cabanas:  
Técnicas para el  
mantenimiento y  
diagnóstico de  
máquinas  
eléctricas  
rotativas



# 6.5. FEM inducida en un máquina de CC

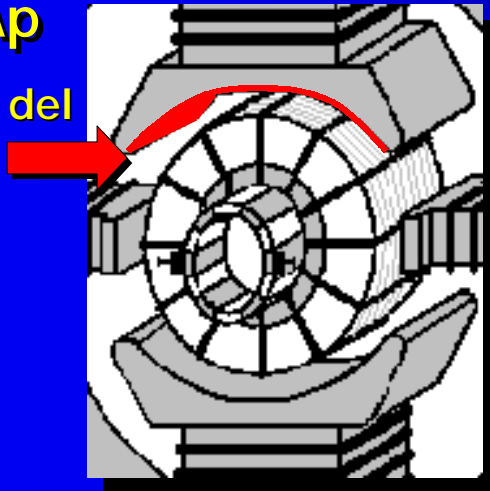
FEM EN UNA ESPIRA  $\longrightarrow E = 2 \cdot B \cdot l \cdot v$

FEM DE INDUCIDA POR EL DEVANADO COMPLETO DE LA MÁQUINA  $\longrightarrow$

$$E = N \cdot \frac{2VBI}{a} \left\{ \begin{array}{l} N = n^\circ \text{ total de espiras} \\ a = n^\circ \text{ de circuitos en paralelo} \end{array} \right.$$

$$\phi = B \cdot A_p$$

$A_p$  = área del polo



$$A_p \cong \frac{A_{\text{Rotor}}}{N^\circ \text{ polos}} = \frac{2\pi \cdot r \cdot l}{2p} = \frac{\pi \cdot r \cdot l}{p}$$

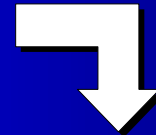
$$E = N \cdot \frac{2V}{a} \cdot \frac{p \cdot \phi}{\pi \cdot r} \longleftarrow B = \phi \cdot \frac{p}{\pi \cdot r \cdot l}$$

$$v = \omega \cdot r = n \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot r \left\{ \begin{array}{l} n = \text{Velocidad en RPM} \\ r = \text{radio} \end{array} \right.$$

$$E = 4 \frac{N \cdot p}{60a} n \cdot \phi \longrightarrow E = K \cdot n \cdot \phi$$

# 6.6. Par interno de una máquina de CC

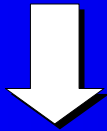
PAR CREADO POR UNA ESPIRA



PAR CREADO POR EL DEVANADO COMPLETO DE LA MÁQUINA

$$T_{\text{espira}} = 2B \cdot l \cdot r \cdot I_{\text{espira}} = 2B \cdot l \cdot r \cdot \frac{I}{a}$$

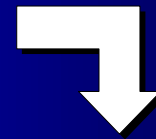
$a = n^\circ$  de circuitos en paralelo  
 $I =$  Corriente rotor (inducido)



$$T_{\text{TOTAL}} = N \cdot 2B \cdot l \cdot r \cdot \frac{I}{a}$$

$N = n^\circ$  total de espiras

$$B = \phi \cdot \frac{P}{\pi \cdot r \cdot l}$$



$$T_{\text{TOTAL}} = \frac{2P \cdot N}{\pi \cdot a} \cdot \phi \cdot I$$

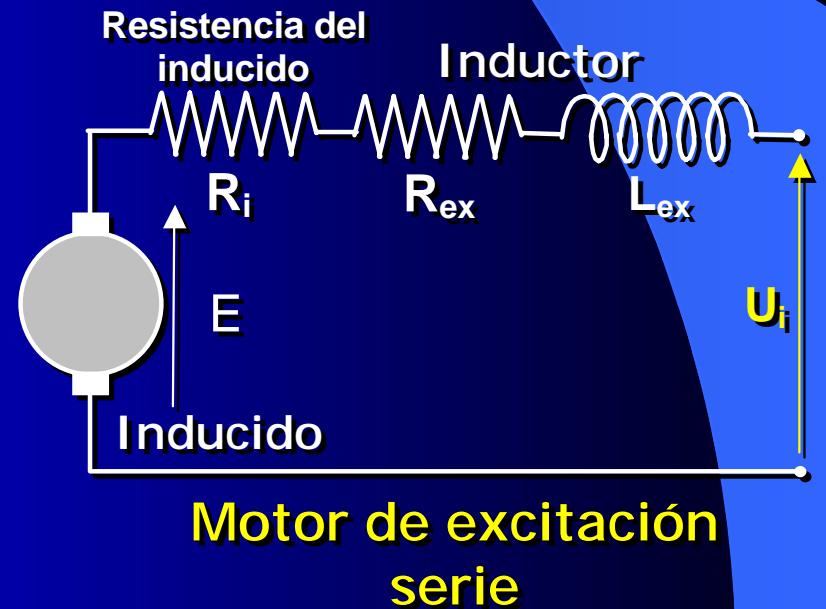
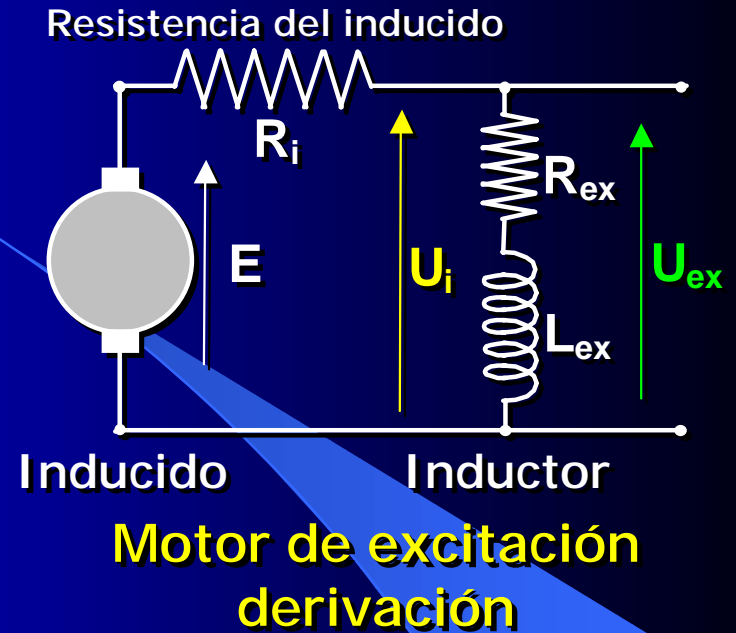
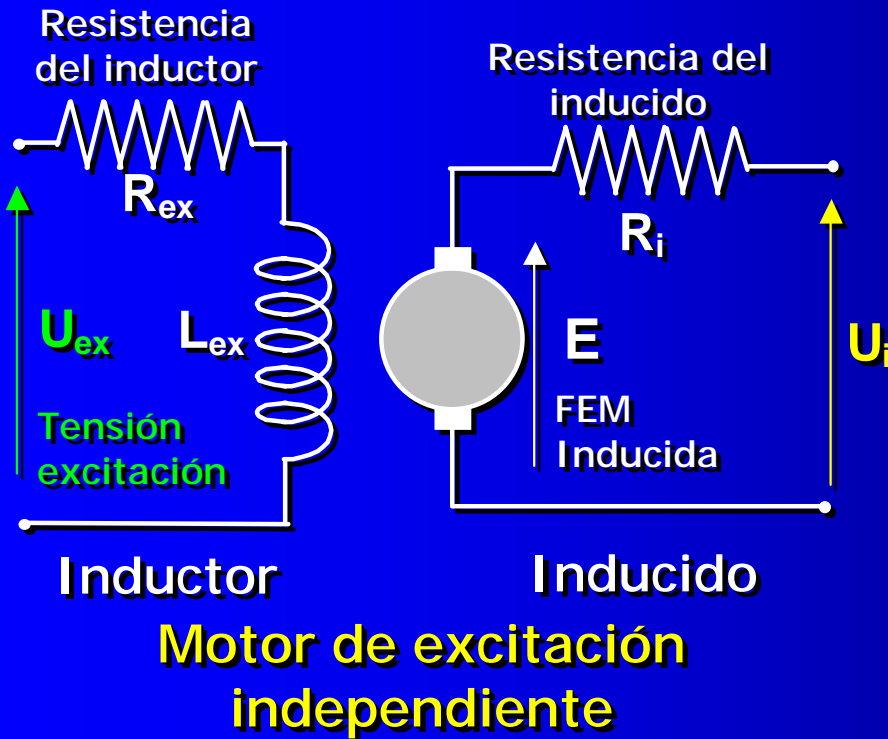
$$T_{\text{TOTAL}} = K \cdot \phi \cdot I$$

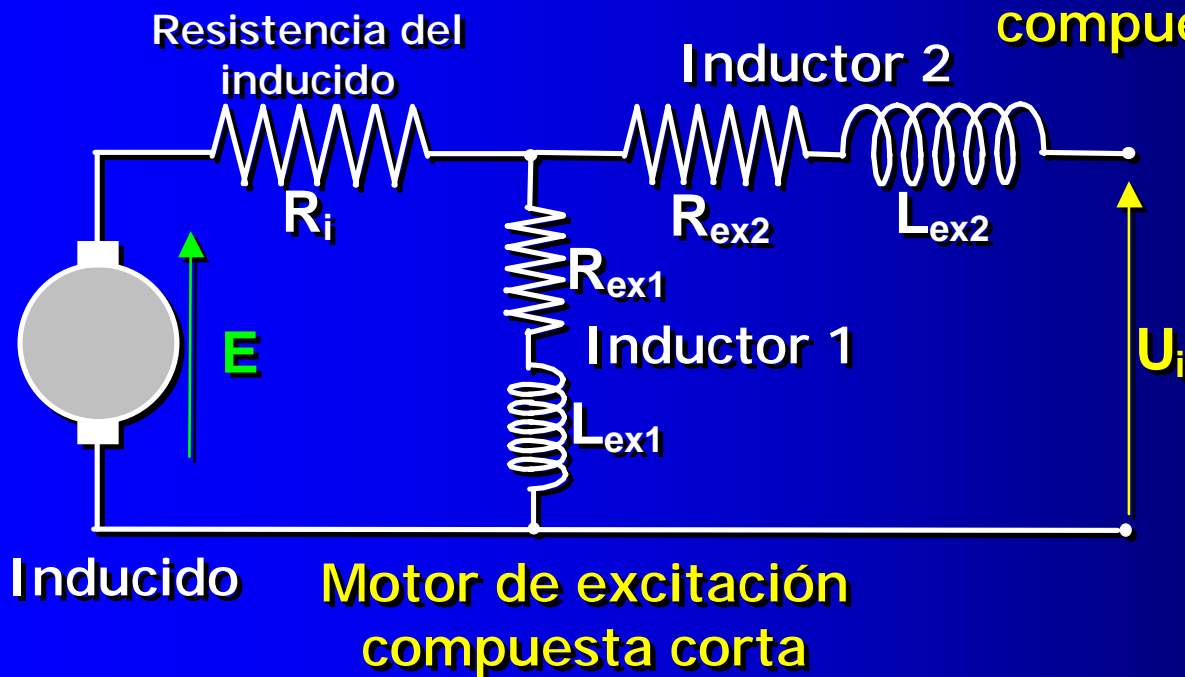
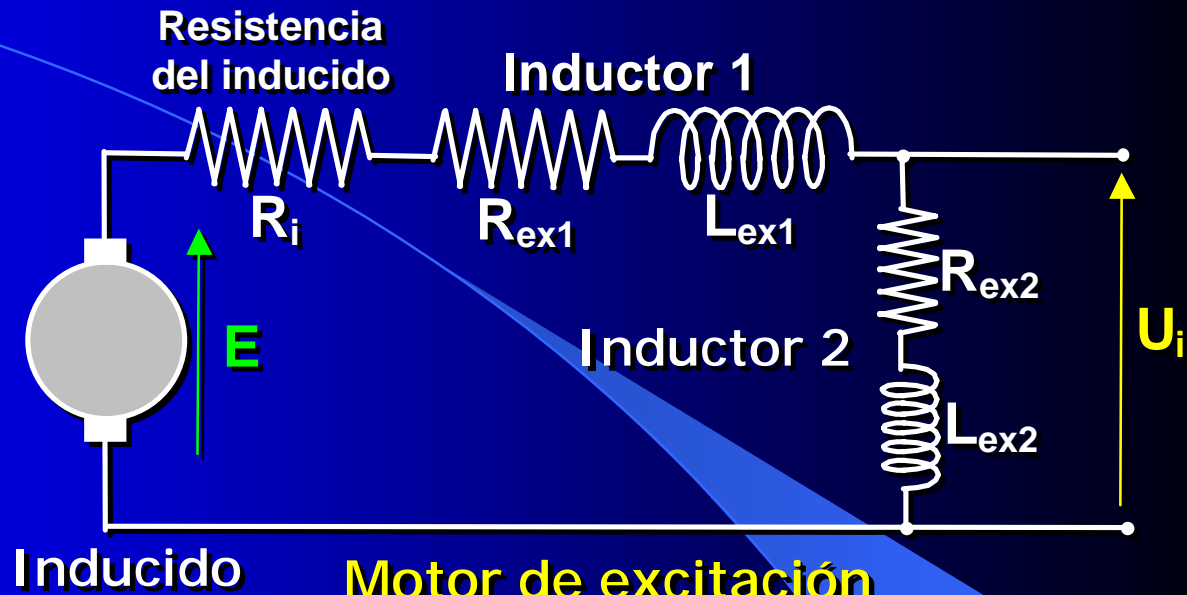
$I =$  Corriente de inducido

# 6.7. Formas de excitación I

- El campo magnético de la máquina de CC puede generarse mediante imanes permanentes, o con bobinas alimentadas con CC (caso habitual):
- Según la forma de alimentación de las bobinas se tienen 2 tipos de excitación:
  - ✓ Excitación independiente: la corriente que alimenta al devanado inductor es ajena a la propia máquina, procede de una fuente independiente externa.
  - ✓ Autoexcitación: la corriente de excitación en este caso procede de la propia máquina. Según la forma de obtener esta corriente existen 3 tipos diferentes de máquina de CC:
    - Excitación Serie: devanado inductor en serie con el inducido
    - Excitación derivación: devanado inductor conectado directamente a las escobillas, por tanto, en paralelo con el inducido.
    - Excitación compuesta o mixta: una bobina en serie y la otra en paralelo.

# 6.7. Formas de excitación II

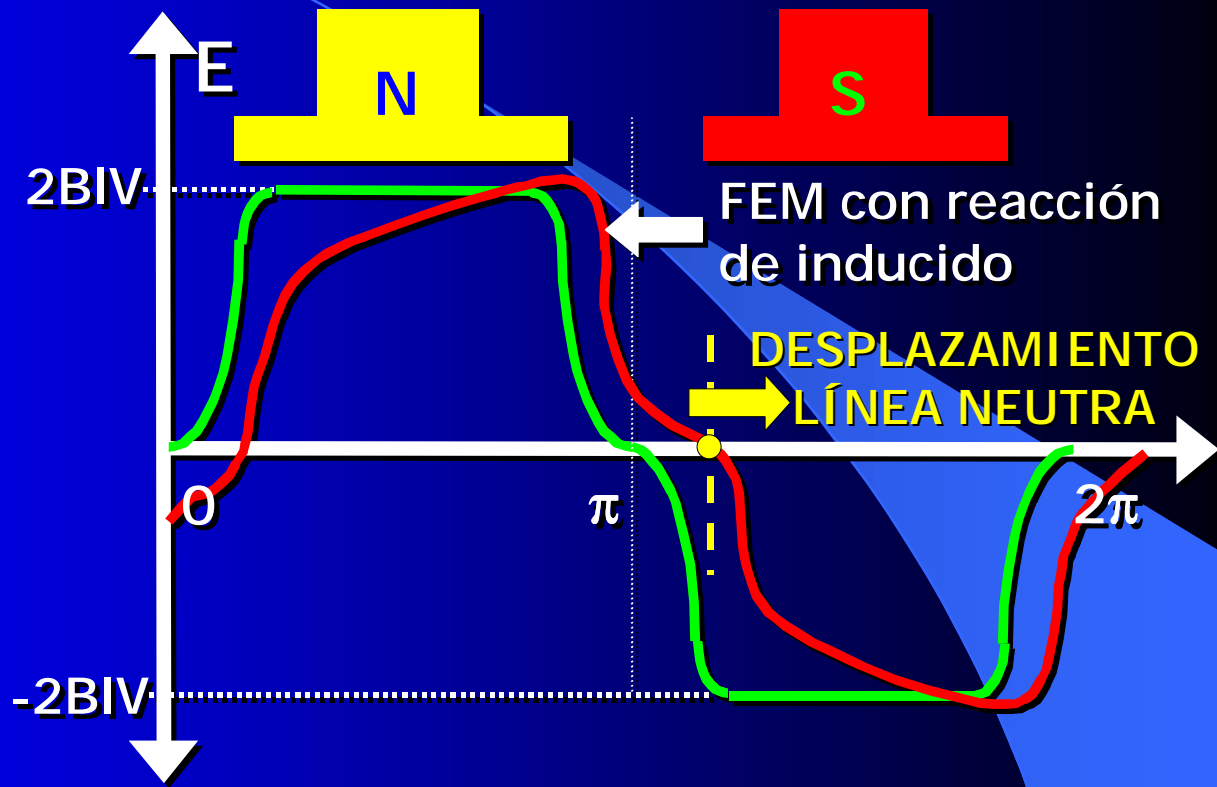




# 6.8. La reacción de inducido I

Al circular corriente por el inducido se va a crear un campo que distorsiona el campo creado por los polos inductores de la máquina

Esta distorsión del campo recibe el nombre de reacción de inducido



EFFECTOS  
PRODUCIDOS  
POR LA  
REACCIÓN DE  
INDUCIDO

Desplazamiento de la "plano o línea neutra" (plano en el que se anula el campo)

Disminución del valor global del campo de la máquina

# 6.8. La reacción de inducido II

Desplazamiento de la "plano o línea neutra"

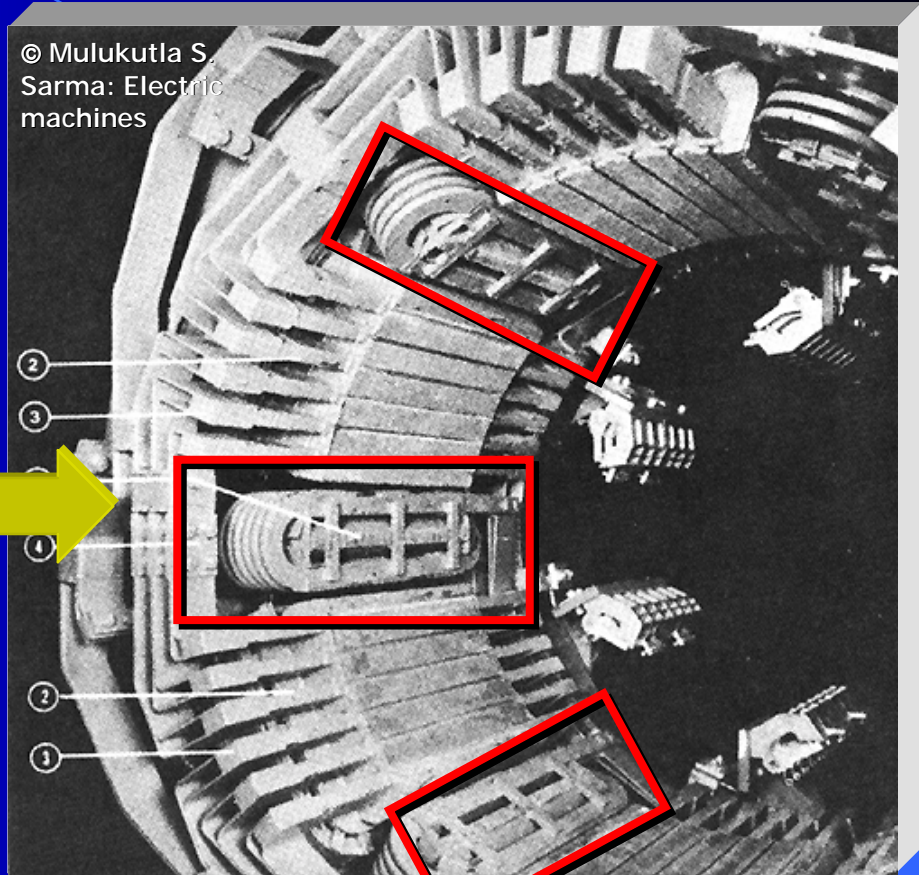
PROBLEMAS DURANTE LA CONMUTACIÓN

POLOS DE CONMUTACIÓN

REDUCCIÓN PAR Y AUMENTO VELOCIDAD

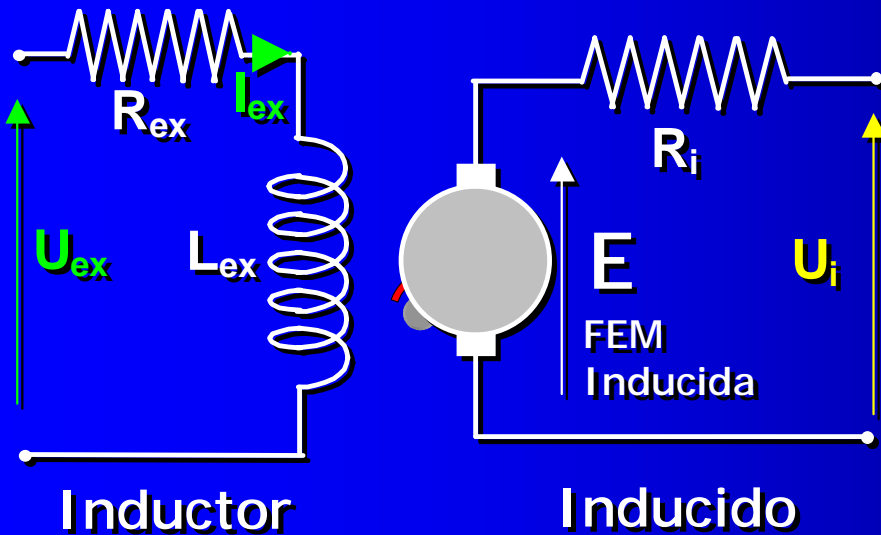
Disminución del valor global del campo de la máquina

© Mulukutla S. Sarma: Electric machines



LOS POLOS DE CONMUTACIÓN COMPENSAN LOCALMENTE LA REACCIÓN DE INDUCIDO ELIMINANDO LA DISTORSIÓN DEL CAMPO

# 6.9. La máquina de CC como generador I



Se hace girar el inducido y se alimenta el inductor. La tensión de excitación controla la FEM  $E$  y, por tanto, la tensión de salida  $U_i$

La tensión de salida crece proporcionalmente con la velocidad de giro  $n$

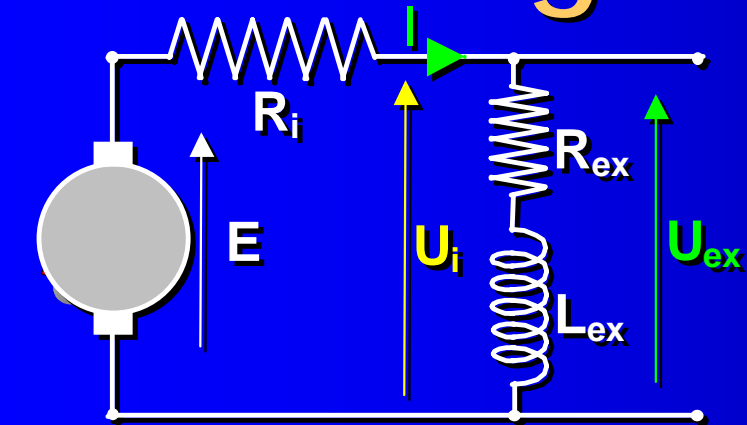
Inductor  
Inducido  
**Generador con excitación independiente**

$$E = 4 \frac{N \cdot p}{60a} n \cdot \phi \quad \longrightarrow \quad E = K \cdot n \cdot \phi$$

La relación entre la corriente de excitación y la FEM inducida no es lineal: existe saturación



# 6.9. La máquina de CC como generador II

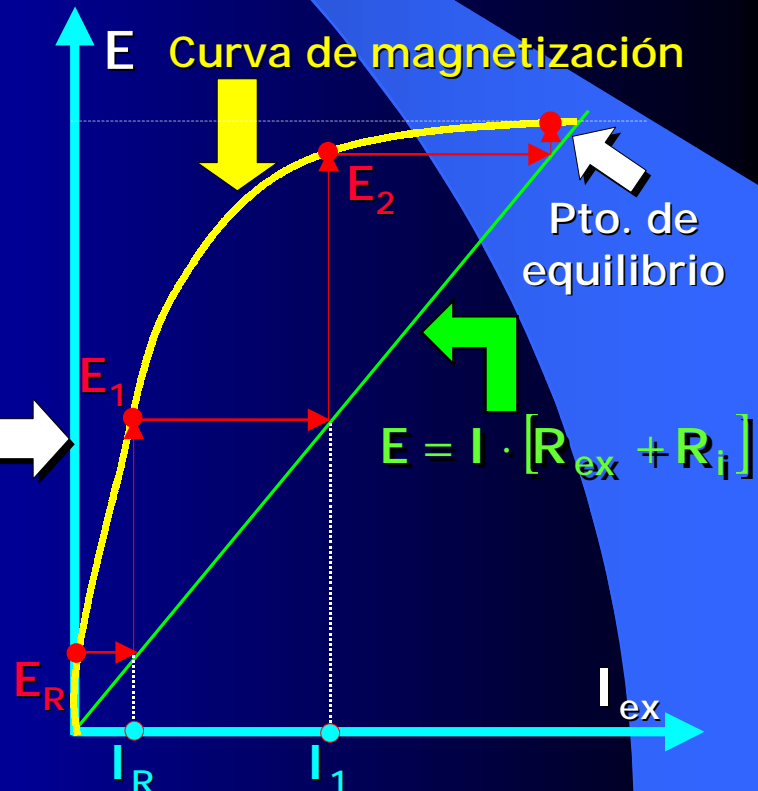
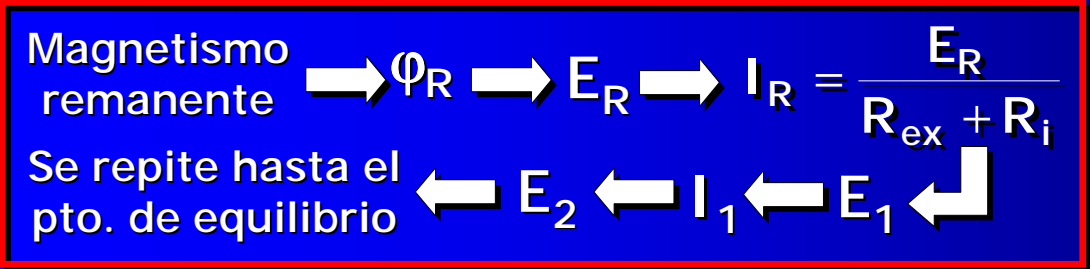


Inducido Inductor  
**Generador con excitación derivación**

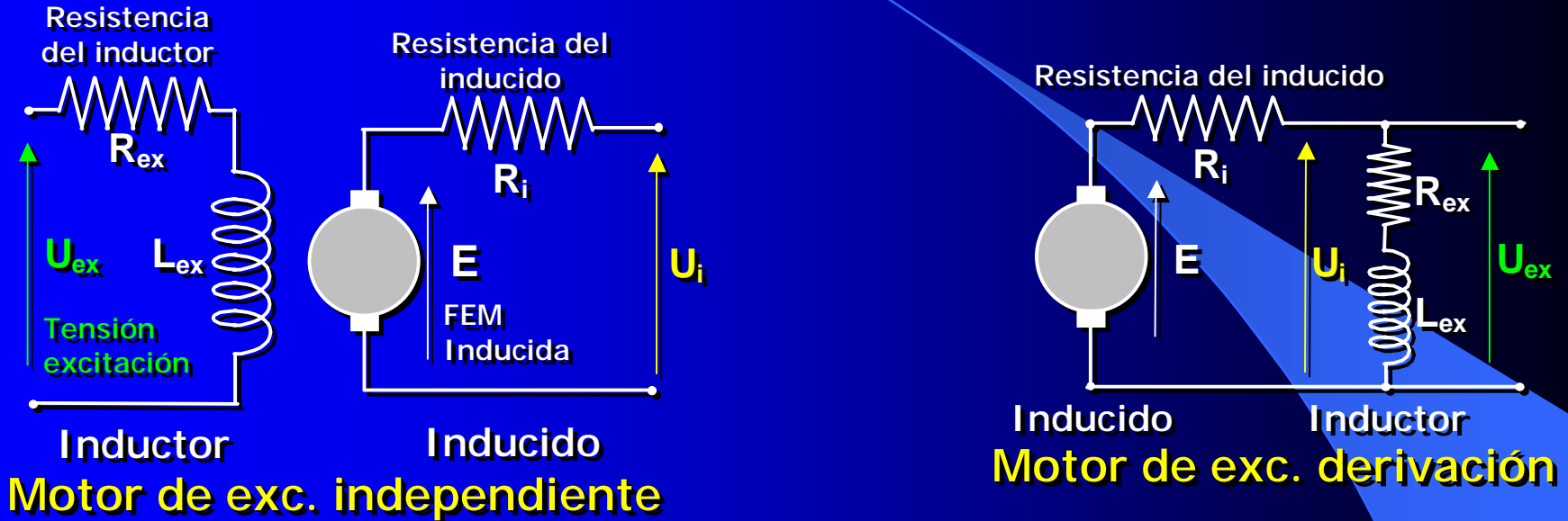
En la generador en derivación la propia tensión de salida del generador se utiliza para producir la excitación

$$U_{ex} = U_i$$

El generador "arranca" gracias al magnetismo remanente siguiendo un proceso de AUTOEXCITACIÓN



# 6.10. Curvas características de los motores de CC I



Desde el punto de vista funcional ambos motores son muy similares ya que el inducido está sometido a una tensión constante

$$U_i = E - R_i \cdot I_i$$

Ecuación del motor derivación e independiente

$$E = K \cdot n \cdot \phi \quad T = K' \cdot \phi \cdot I_i$$

Ec. General maq. CC

$$n = \frac{U_i}{K \cdot \phi} - \frac{T}{K \cdot K' \cdot \phi^2} \cdot R_i$$

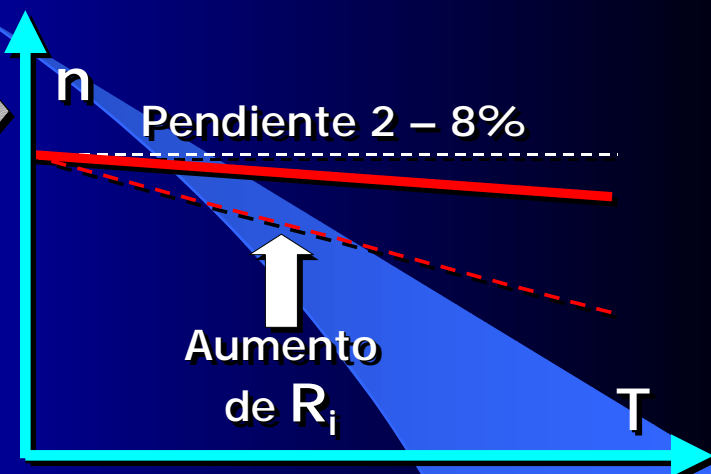
$$I_i = \frac{T}{K' \cdot \phi} \quad U_i = K \cdot \phi \cdot n + \frac{T}{K' \cdot \phi} \cdot R_i$$

# 6.10. Curvas características de los motores de CC II

Curva par-velocidad de los motores de excitación independiente y derivación

$$n = \frac{U_i}{K \cdot \phi} - \frac{T}{K \cdot K' \cdot \phi^2} \cdot R_i$$

CONSIDERANDO CTES.  $U_i$  y  $\phi$



## CARACTERÍSTICA DE VELOCIDAD

$$n = f(I_i)$$

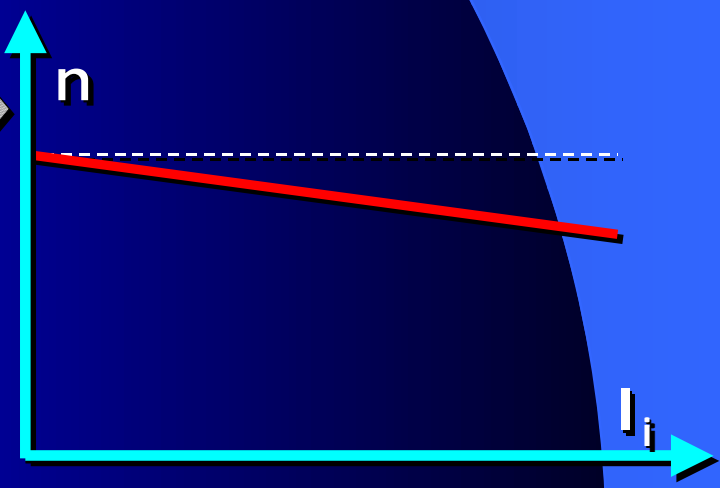
$$U_i = E - R_i \cdot I_i$$

$$E = K \cdot n \cdot \phi$$

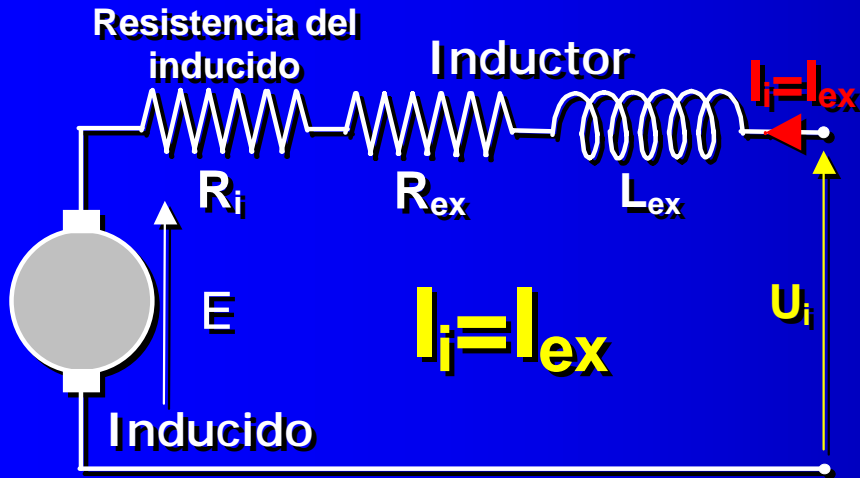
$\phi = cte$

$$n = \frac{U_i}{K \cdot \phi} - \frac{R_i \cdot I_i}{K \cdot \phi}$$

## CARACTERÍSTICA DURA



# 6.10. Curvas características de los motores de CC III



**Motor de excitación serie**

En el motor serie el devanado de excitación y el inducido están conectados en serie.  $I_{ex} = I_i$  y esta última depende de la carga arrastrada por el motor, por tanto, sus características funcionales serán distintas de las del motor de exc. indep.

$E = U_i - [R_i + R_{ex}] \cdot I_i$  → Ecuación del motor serie

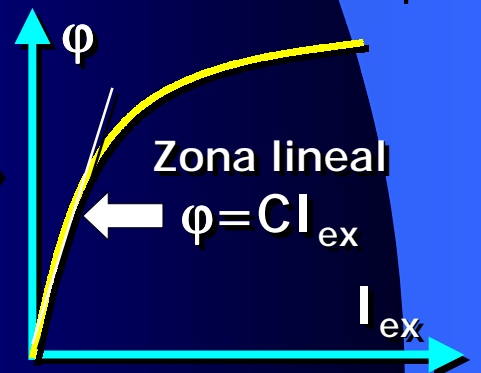
$E = K \cdot n \cdot \phi$  →  $n = \frac{U_i - [R_i + R_{ex}] \cdot I_i}{K \cdot \phi}$  →  $n = \frac{U_i}{K \cdot \phi} - \frac{[R_i + R_{ex}] \cdot T}{K \cdot K' \cdot \phi^2}$

Ec. General maq. CC

$T = K' \cdot \phi \cdot I_i$

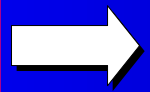
Ec. General maq. CC

La relación entre  $I_{ex}$  y el flujo  $\phi$  viene definida por la característica magnética (B-H) de la máquina



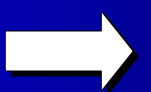
# 6.10. Curvas características de los motores de CC IV

Como  $I_{ex} = I_i$  en la zona lineal del motor se cumple:  
 $\phi = C I_i$



$$T = K' \cdot C \cdot I_i^2$$

En la zona lineal (pares bajos)



$$I_i = \sqrt{\frac{T}{K' \cdot C}}$$

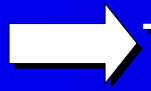
SUSTITUYENDO



La característica mecánica cuando el motor trabaja en la zona lineal (pares bajos). ES UNA HIPÉRBOLA

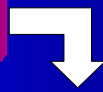
$$n = \frac{U_i}{Cte \cdot \sqrt{T}} - Cte$$

En la zona de saturación (cuando al motor se exigen pares elevados) se puede admitir  $\phi = Cte$



$$T = Cte$$

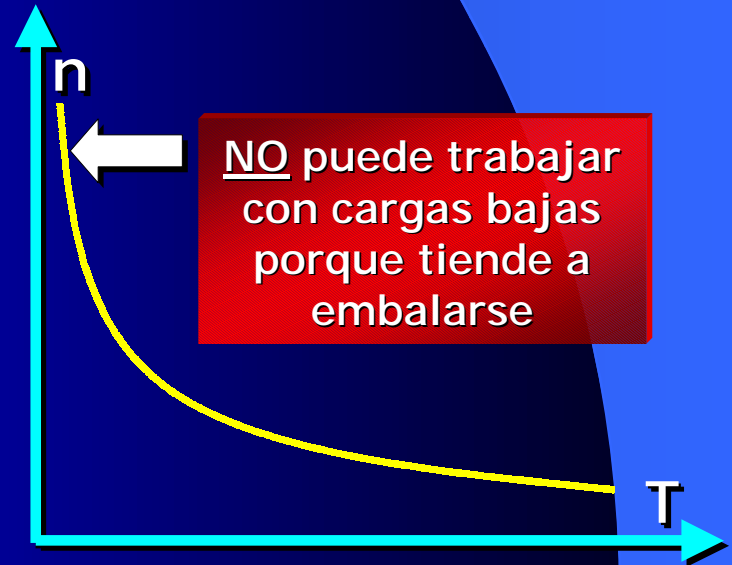
SUSTITUYENDO



$$n = Cte - Cte \cdot T$$

La característica mecánica en la zona de saturación (pares altos) ES UNA RECTA

NO puede trabajar con cargas bajas porque tiende a embalsarse



# 6.10. Curvas características de los motores de CC V

## CARACTERÍSTICA DE VELOCIDAD $n=f(I_i)$

$$E = U_i - [R_i + R_{ex}] \cdot I_i \quad \text{Ecuación del motor serie}$$

$$E = K \cdot n \cdot \phi \quad \text{Ec. General maq. CC}$$

$$U_i = K \cdot \phi \cdot n + I_i \cdot [R_i + R_{ex}]$$

$$n = \frac{U}{K \cdot \phi} - \frac{I_i \cdot [R_i + R_{ex}]}{K \cdot \phi}$$

$$n = \frac{U}{Cte \cdot I_i} - \frac{[R_i + R_{ex}]}{Cte}$$

Como  $I_{ex} = I_i$  en la zona lineal del motor se cumple:  
 $\phi = C I_i$

La característica de velocidad cuando el motor trabaja en la zona lineal ES UNA HIPÉRBOLA



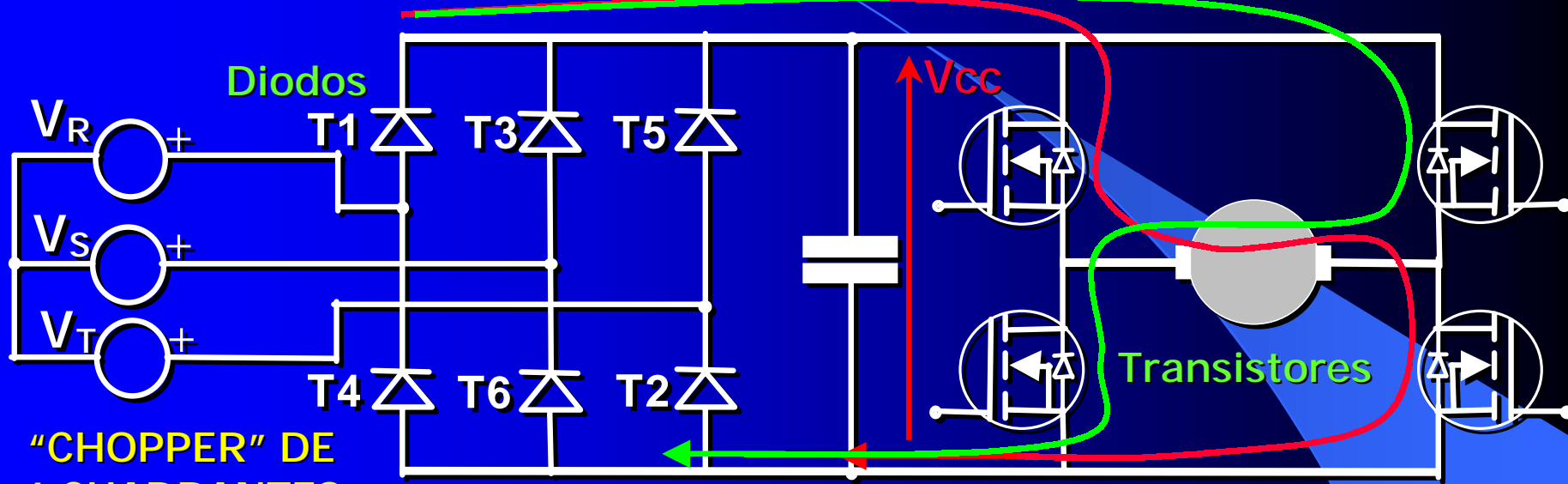
En la zona de saturación se puede admitir  $\phi = Cte$

$$n = \frac{U}{Cte} - \frac{I_i \cdot [R_i + R_{ex}]}{Cte}$$

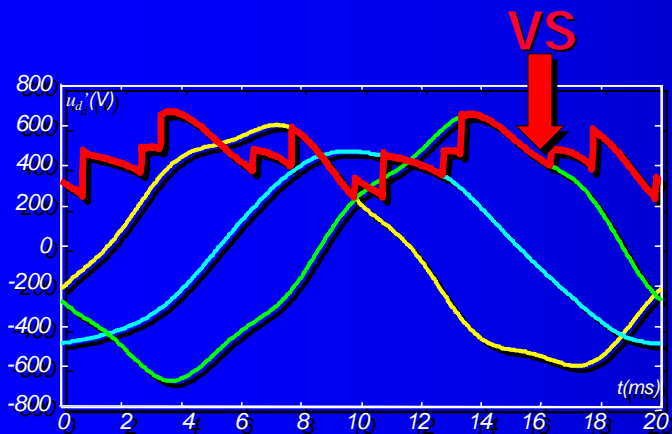
# 6.11. Variación de velocidad en los motores de CC I



# 6.11. Variación de velocidad en los motores de CC II



"CHOPPER" DE 4 CUADRANTES



RECTIFICADOR CONTROLADO

