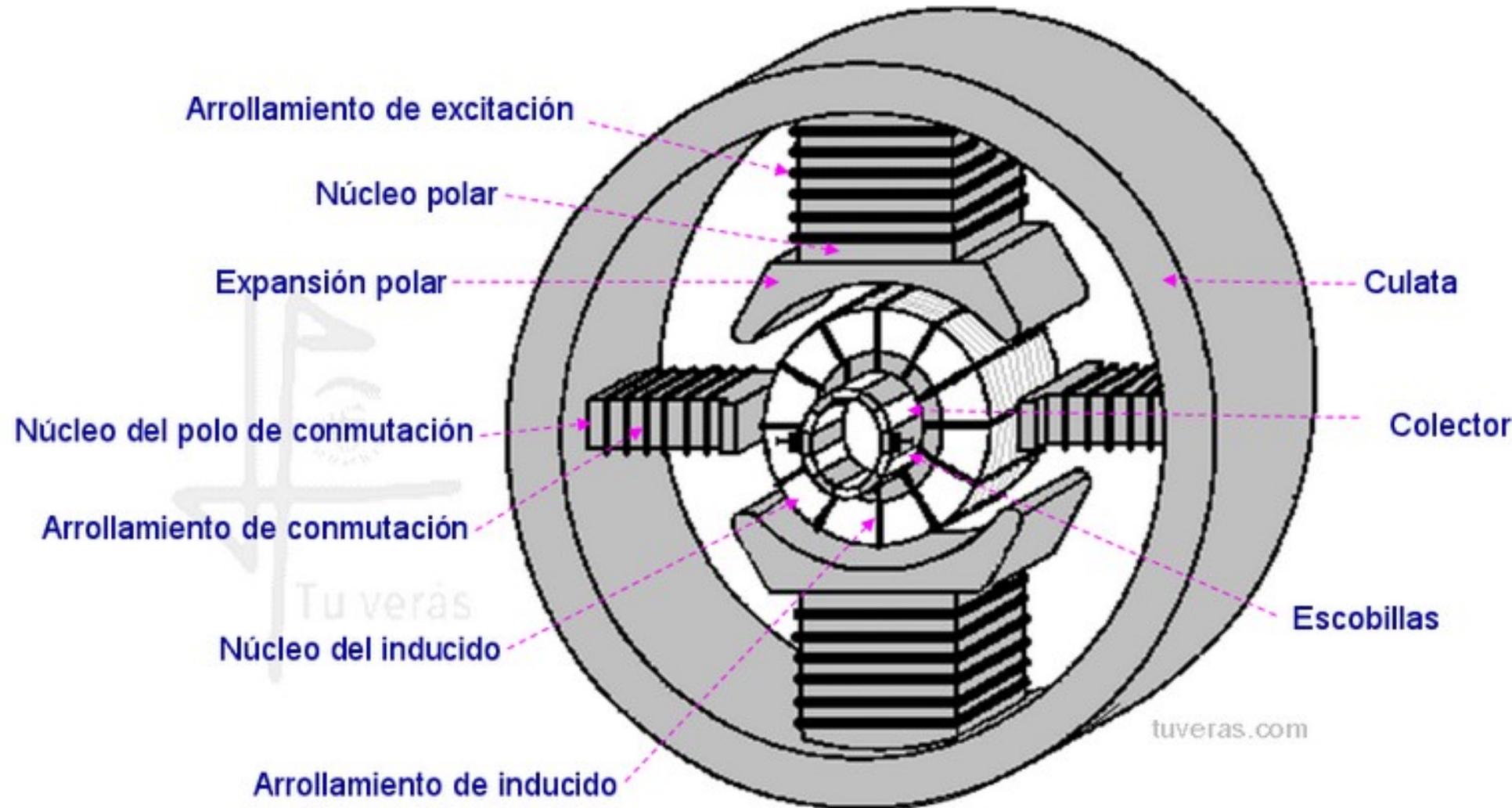


# MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

# Formas constructivas

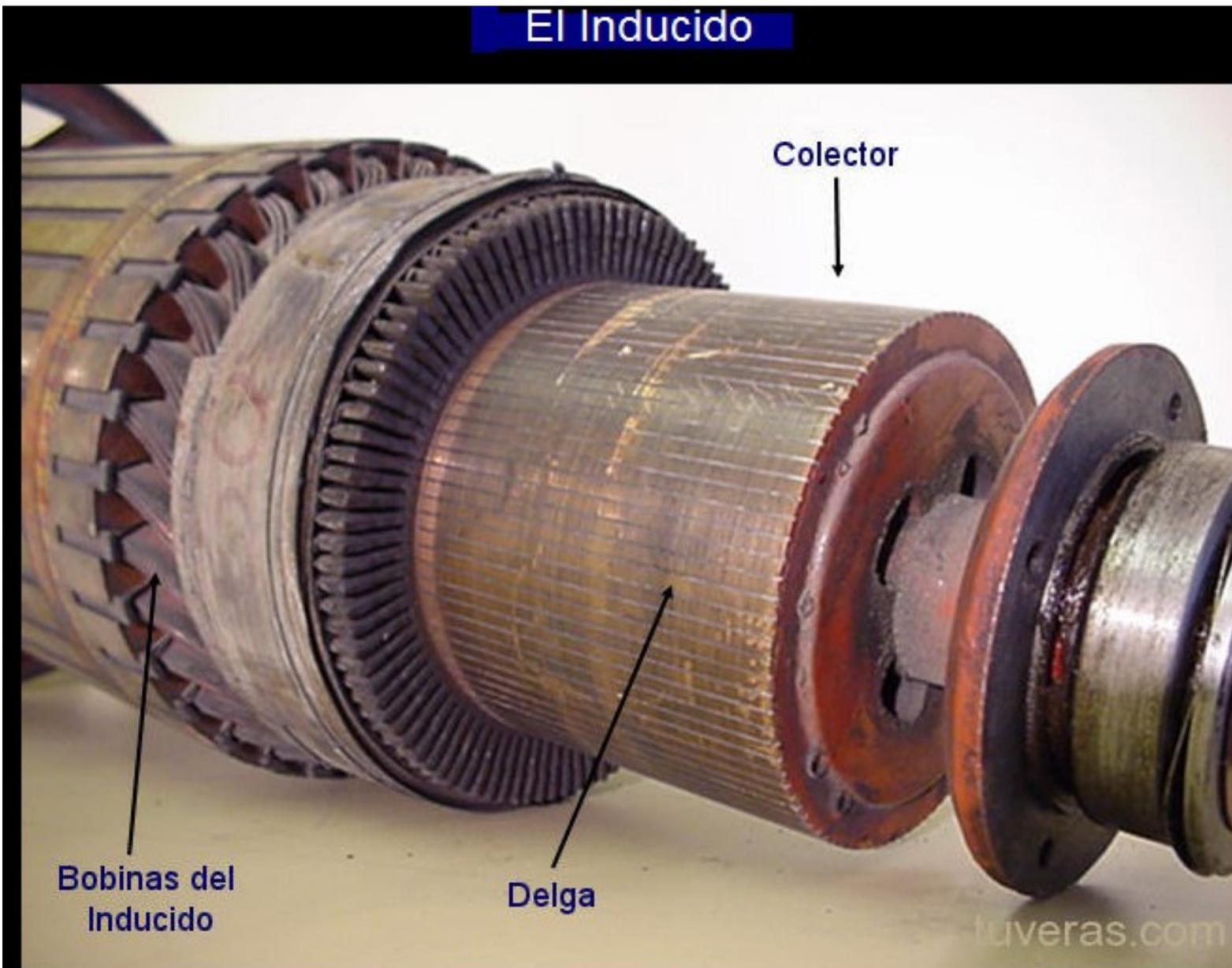
Se Clasifican por su potencia en  $W$ ,  
tensión en  $V$ , velocidad en rpm,  $N^\circ$  de  
polos y formas de excitación.

- Aspectos Constructivos básicos



- Aspectos Constructivos básicos

El Inducido





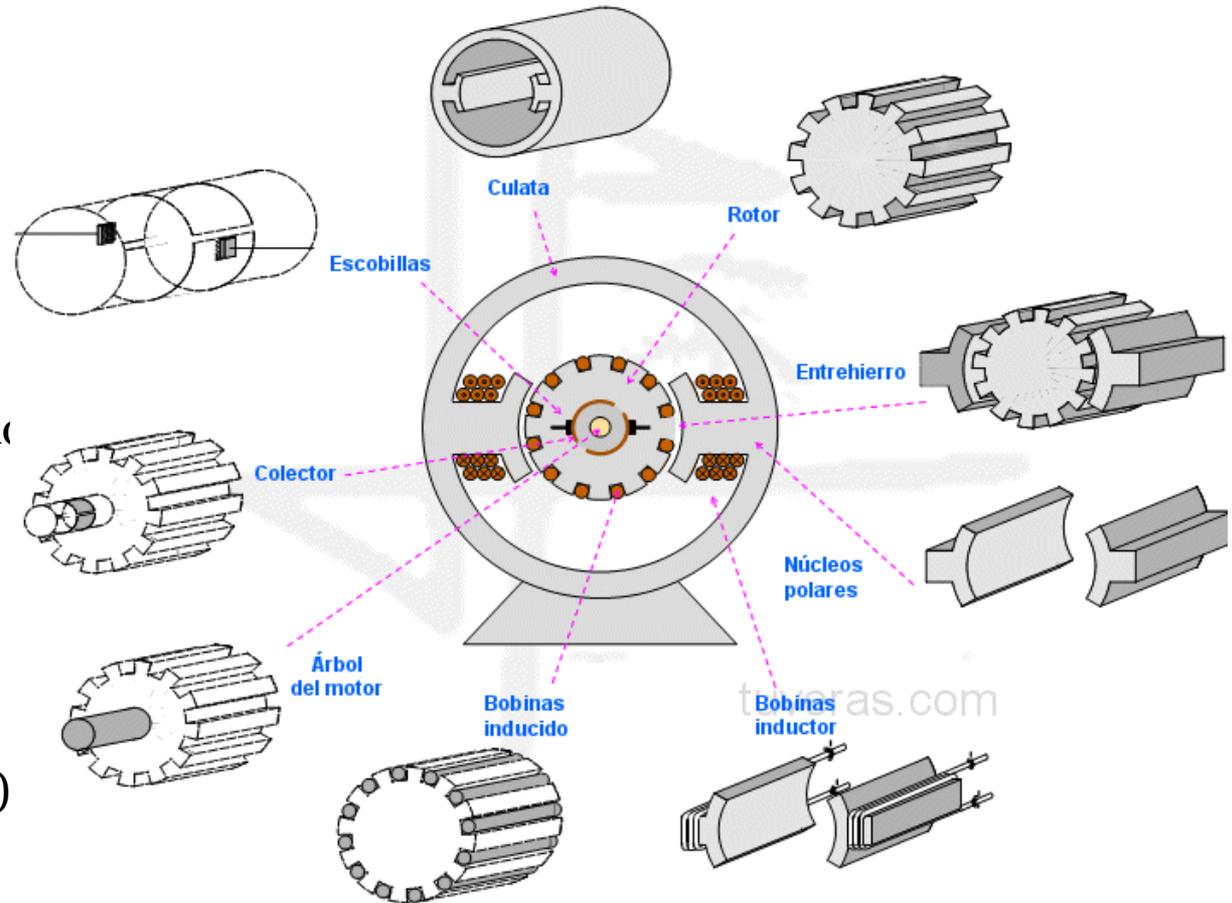
# Esquema básico

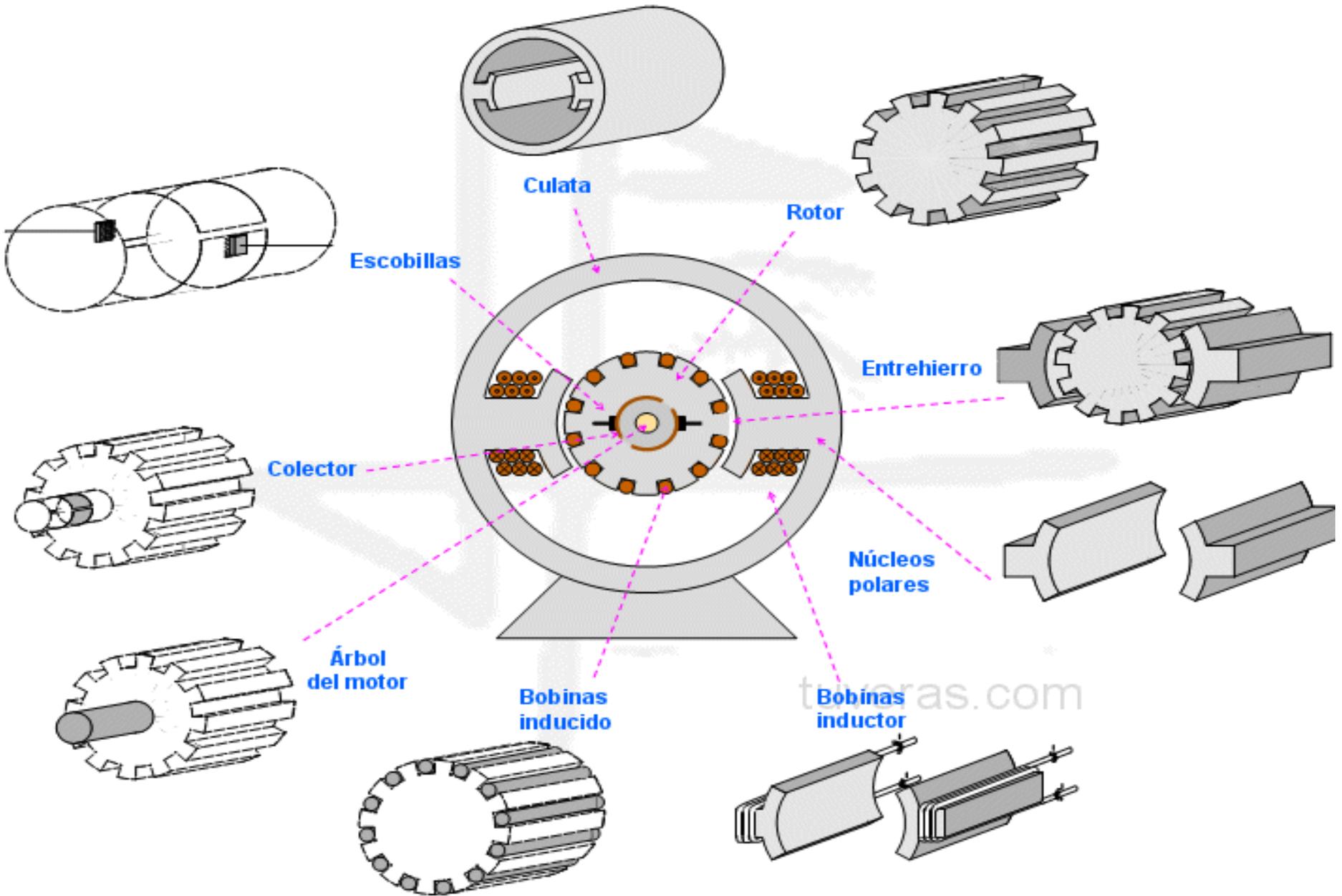
## Elementos móviles:

- Rotor o inducido
- Colector
- Delgas
- Escobillas
- Arrollamiento del inducido

## Parte fija (estator):

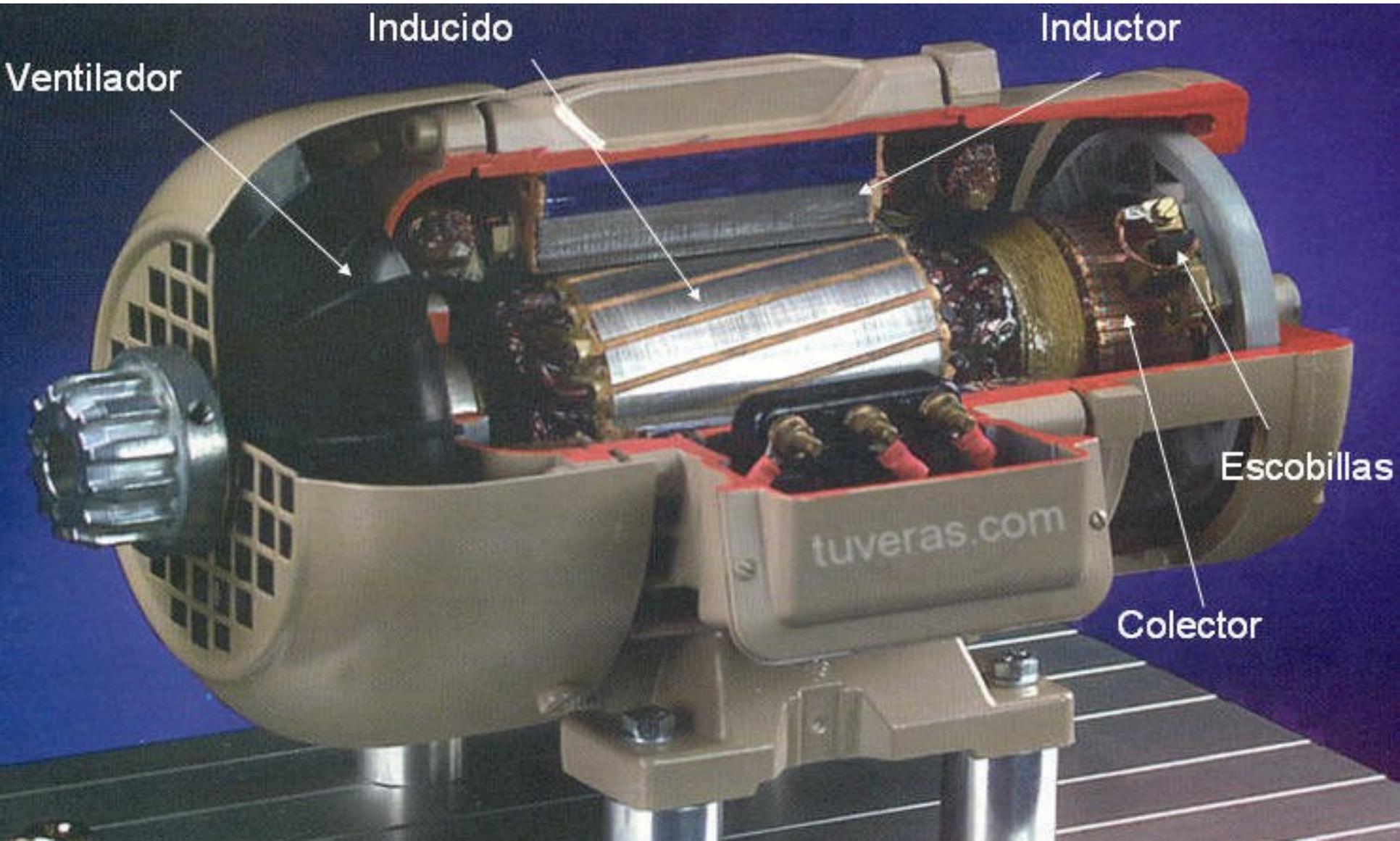
- Corona del estator (culata)
- Polos inductores (núcleo polar y expansiones polares)
- Polos de conmutación
- Devanados de excitación y conmutación.



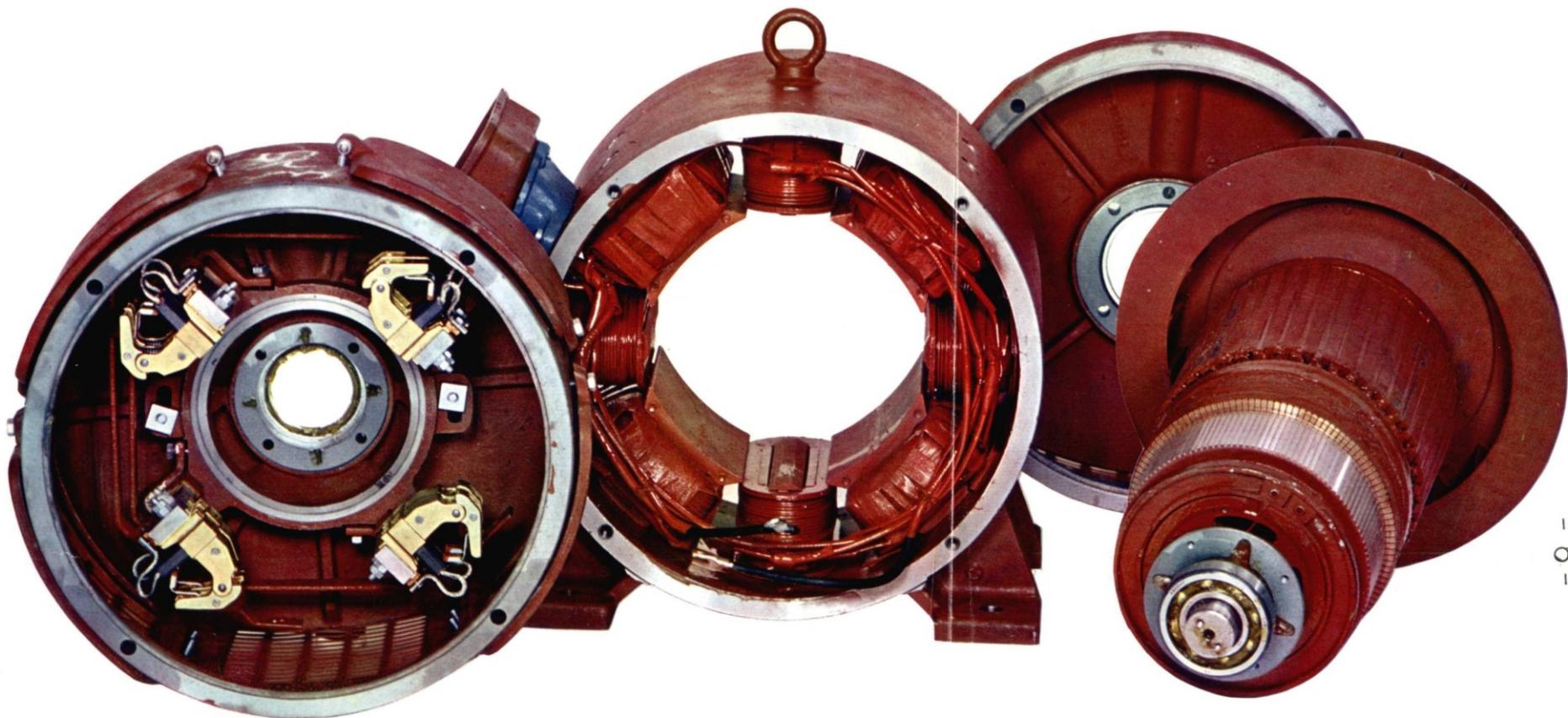




- **Vista en corte**

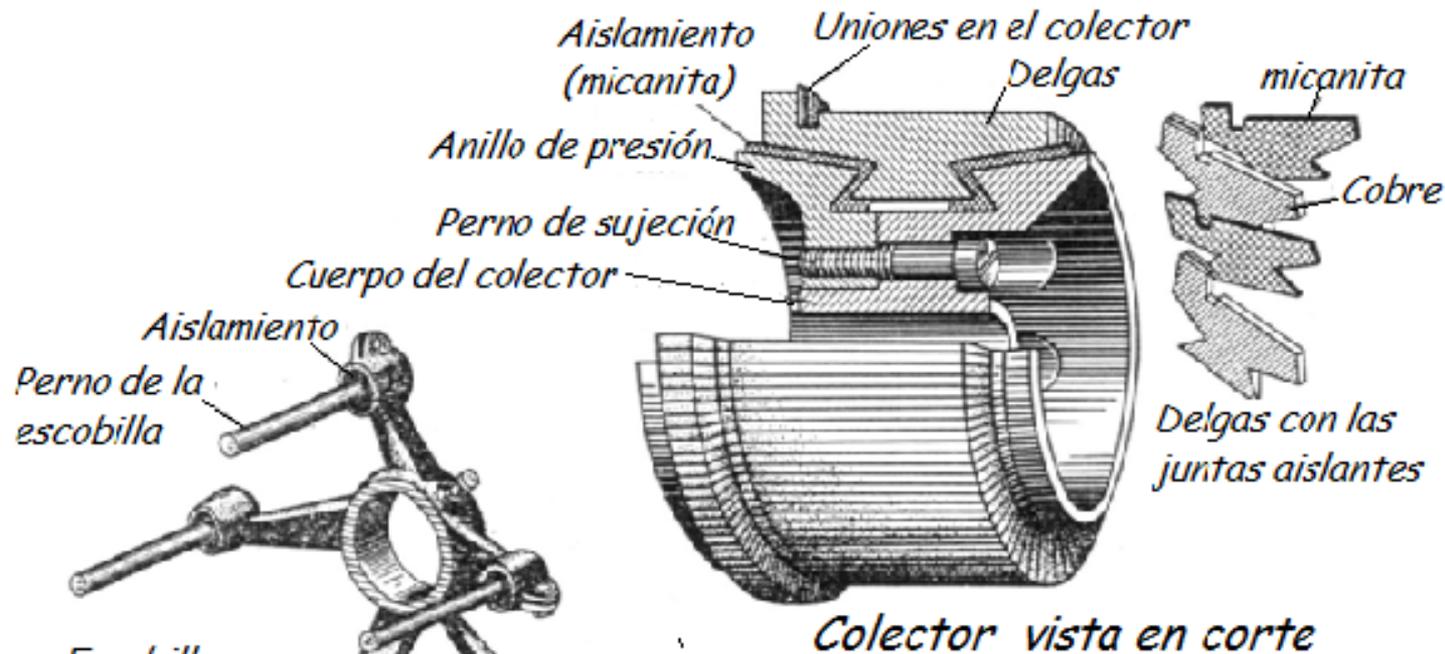


# Motor de corriente continua tetrapolar

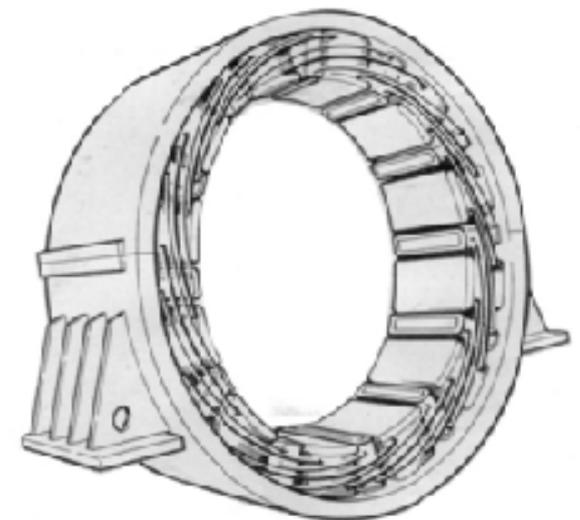
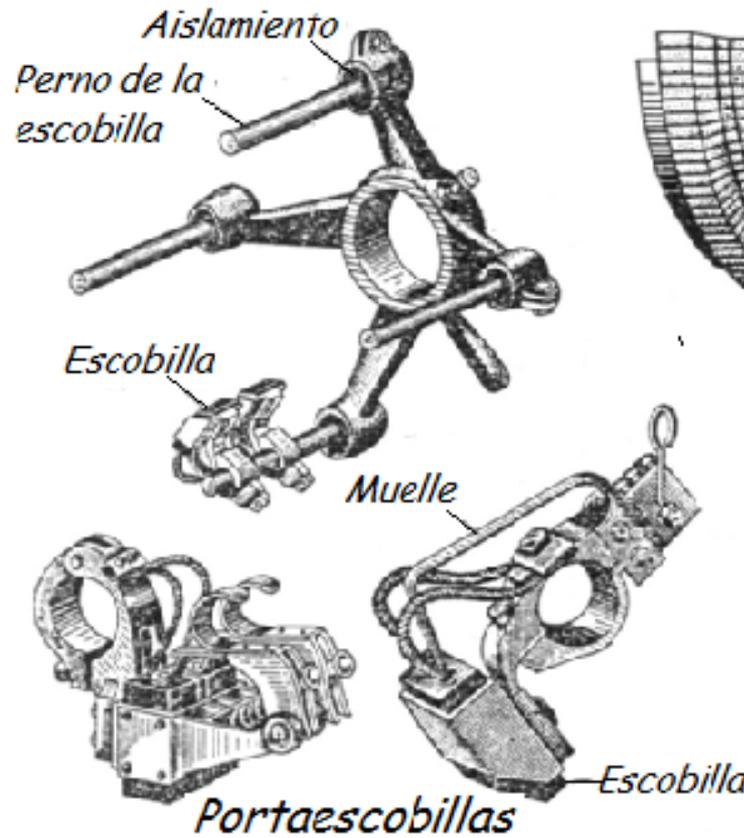


Motor para corriente continua tetrapolar.

# Partes de Maquina de C.C.

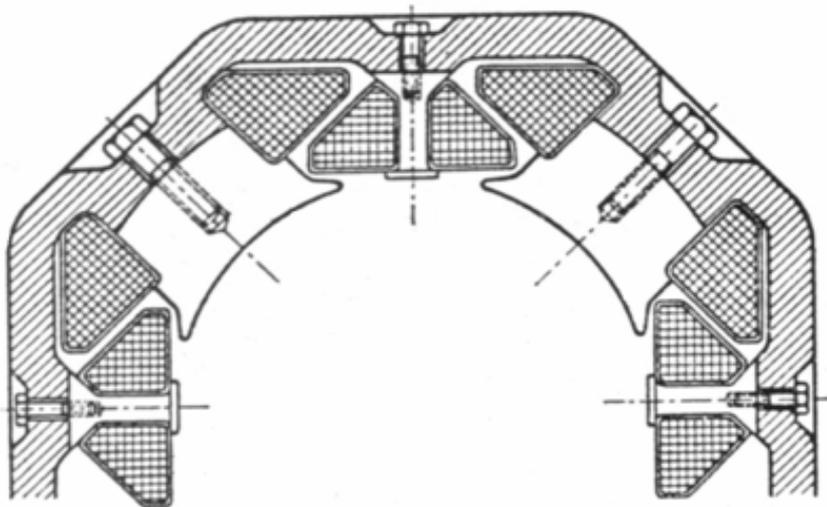


*Colector vista en corte*

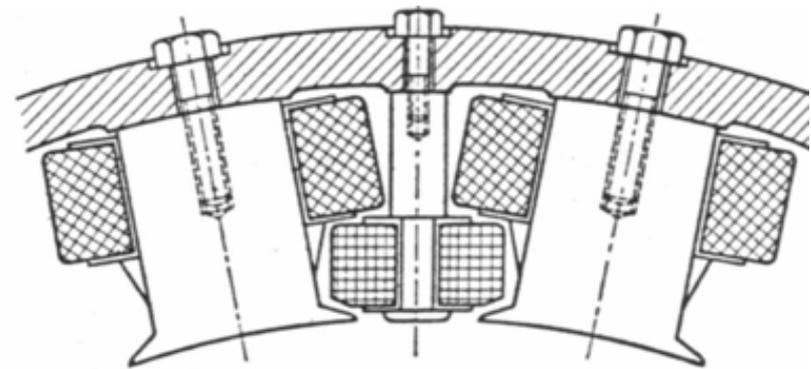


*Corona del estator de una máquina de gran potencia*

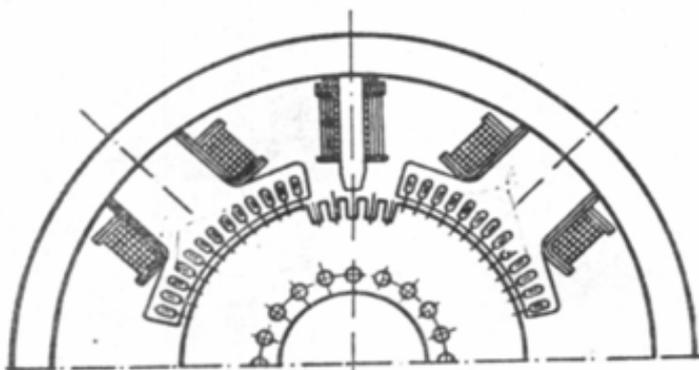
# Partes de Maquina de C.C.



Polos principales y de conmutación



Polos principales y de conmutación



Polos principales, de conmutación y arrollamiento compensador en las ranuras de las expansiones polares

# Principio de funcionamiento

# Generación de la fem.

## Consideremos:

- una máquina bipolar, con un inducido que posee una bobina, cuyos extremos se conectan a dos anillos que gira en sentido antihorario como *generador*.

- **de 1 a 2:** crece B y la fem. cinética generada.

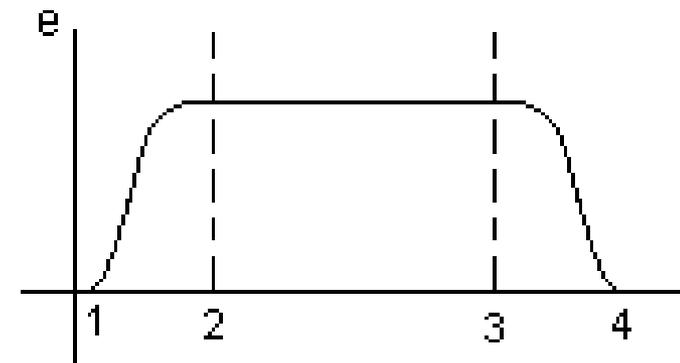
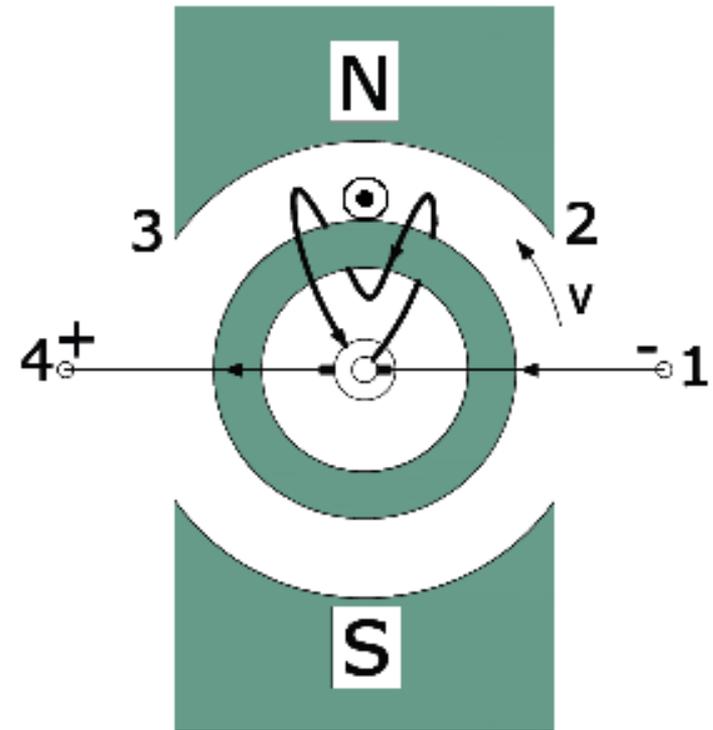
$$e = B \cdot l \cdot v$$

- **de 2 a 3:** la bobina recorre el entrehierro donde:

$$B = cte$$

- **de 3 a 4:** decrece B y decrece la fem.

- **zonas 1 y 4:** bobina paralela a líneas de campo, entonces no genera fem.



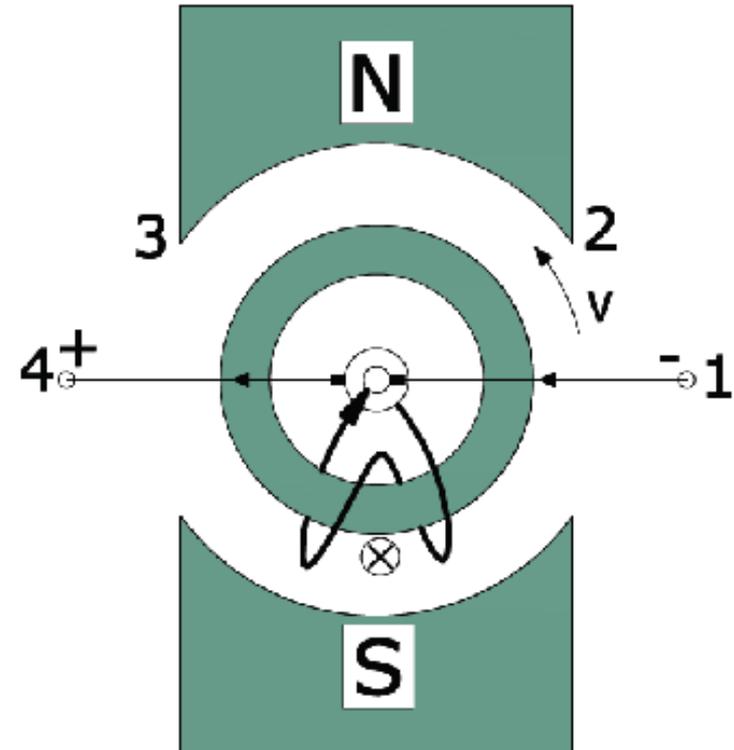
# Generación de la fem.

- **zona neutra ZN:** entre líneas 1 y 4.
- **paso polar:** distancia entre dos zonas neutras o entre líneas medias polares, medida sobre el perímetro del inducido.

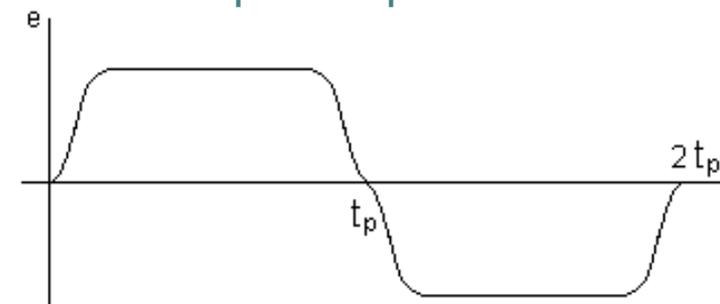
$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad \text{p: número de pares de polos.}$$

En una máquina multipolar, la bobina generará un ciclo cada vez que pase bajo un par de polos.

- **convención:** en los generadores el borne por el cual sale la corriente se lo designa como (+); el otro será el (-).



Una vuelta del inducido en una máquina bipolar



# Generación de la fem.

**Conclusión:** Dado que los bornes cambian de polaridad en el ejemplo estudiado, concluimos que:

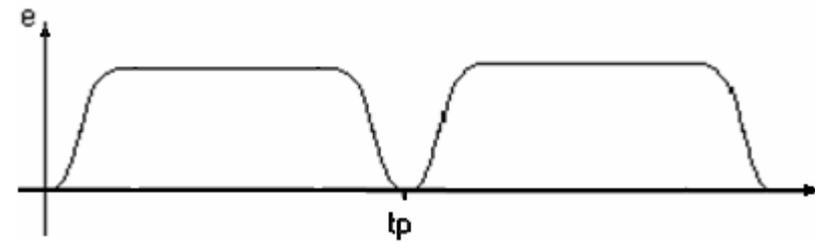
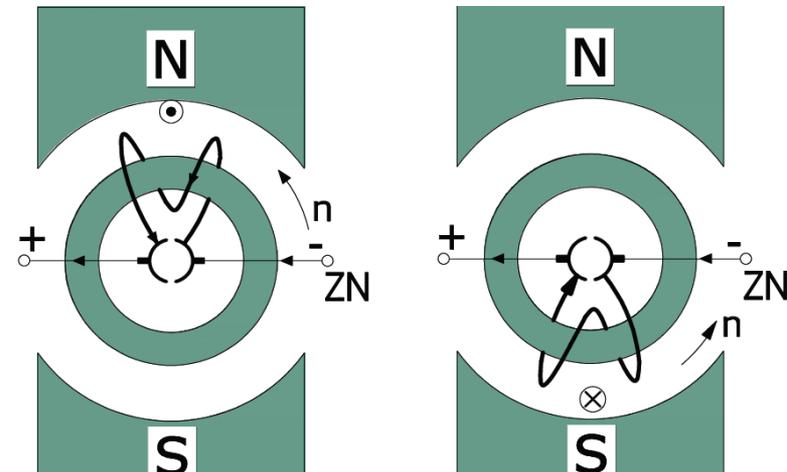
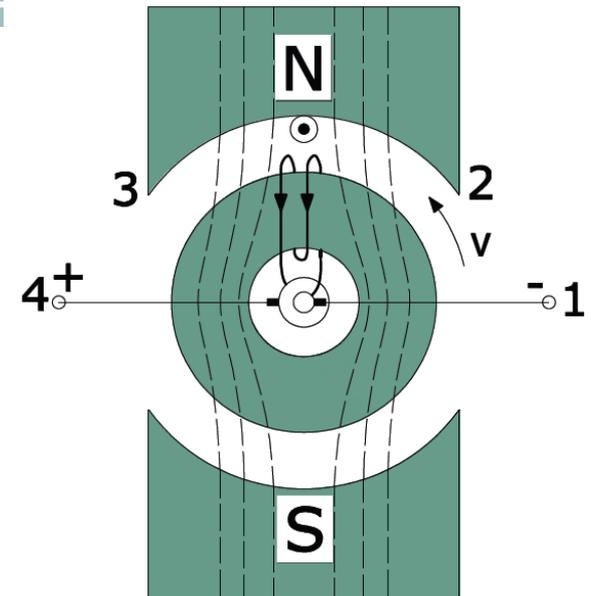
Las bobinas del inducido generan corrientes alternas, no senoidales.

Por ello se construye el inducido laminado.

▪ **colector:** rectificador mecánico.

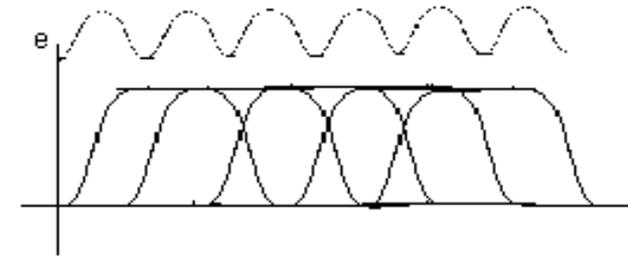
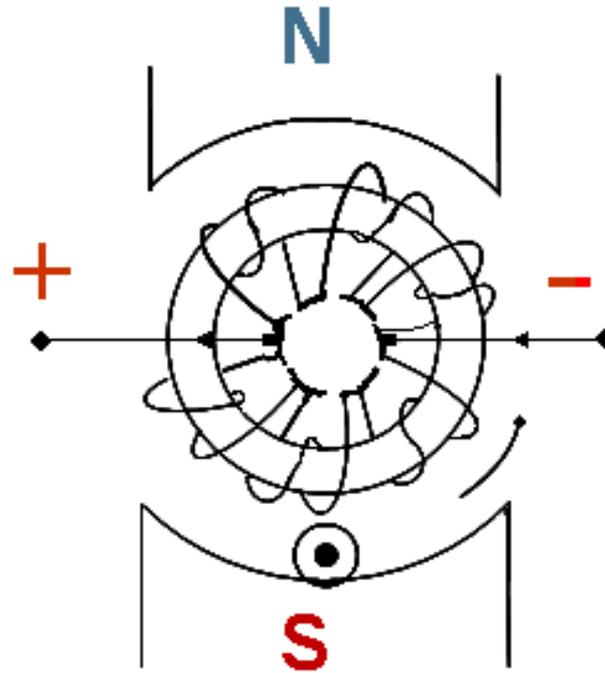
Constituido por delgas:

- dispuestas de modo que la inversión de la conexión se produzca sobre la ZN.
- cada delga contiene el fin de una bobina y el principio de la siguiente.



# Generación de la fem.

**Conclusión:** para tener una onda lo más continua posible, conviene disponer de muchas bobinas en el inducido.



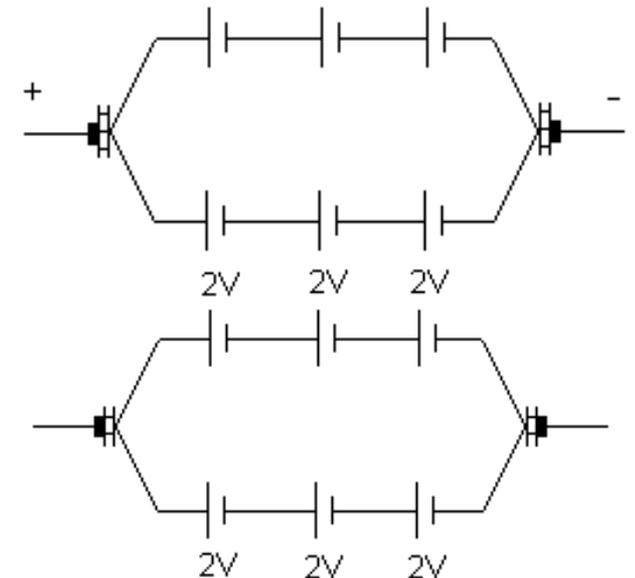
## ▪ circuito equivalente:

siendo: **a**: n° de pares de ramas en paralelo.

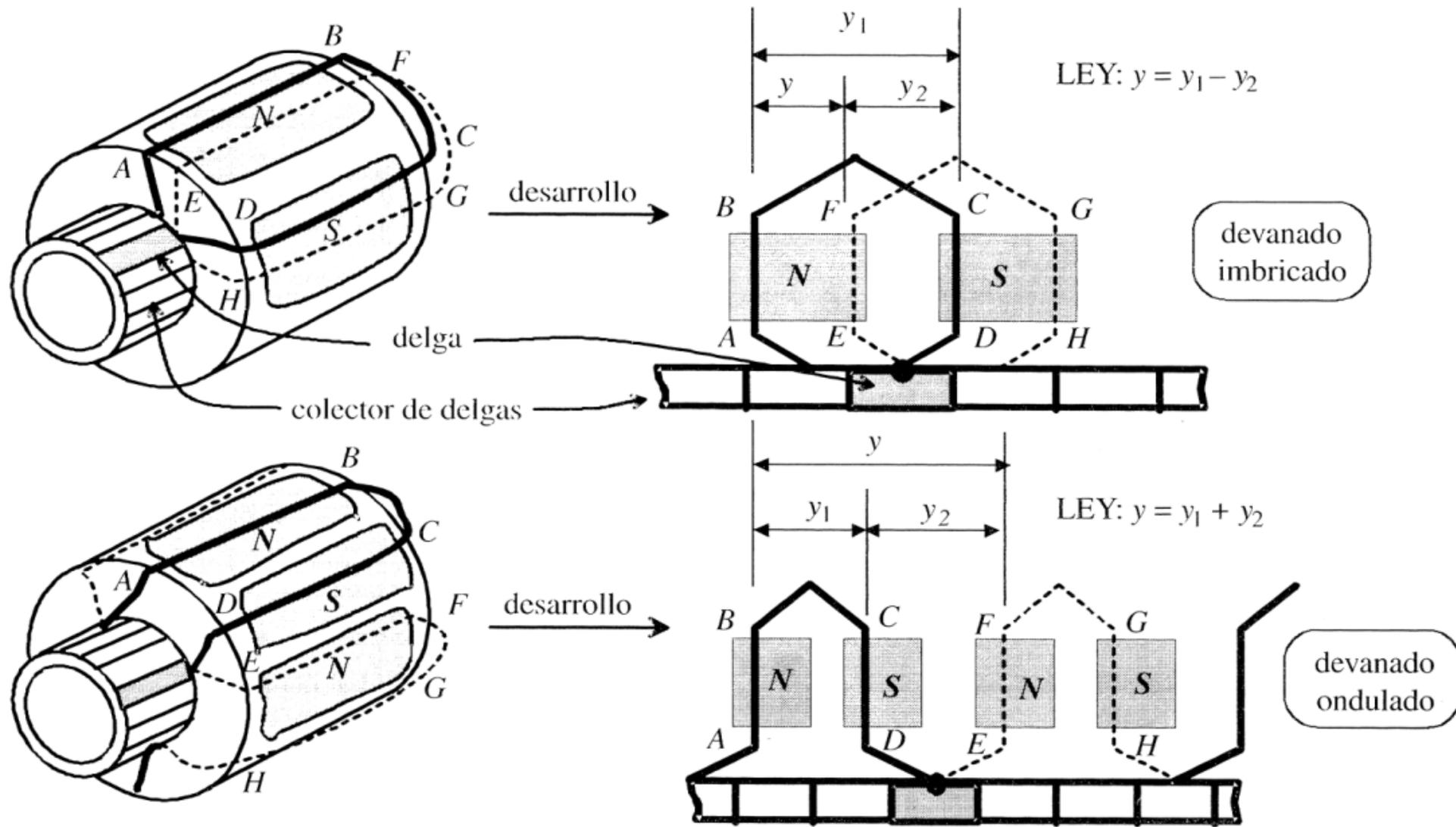
**N**: n° de conductores activos.

- conductor => 1V
- bobina => 2V (2 conductores por bobina)

• la tensión generada en escobillas:  $\frac{N}{2a} = \frac{12}{2} = 6V$



# • BOBINADOS



Devanados imbricado y ondulado.

# Expresión del valor medio de la fem. continua

$$e_{med} = B_{med} \cdot l \cdot v \quad (\text{fem. inducida en un conductor})$$

$$E = \frac{N}{2a} \cdot e_{med} = \frac{N}{2a} \cdot B_{med} \cdot l \cdot v \quad (\text{fem. inducida en el total N de conductores})$$

siendo:

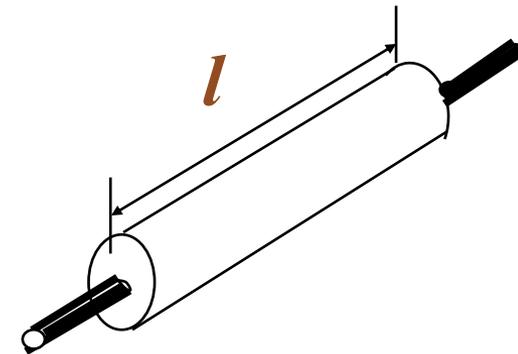
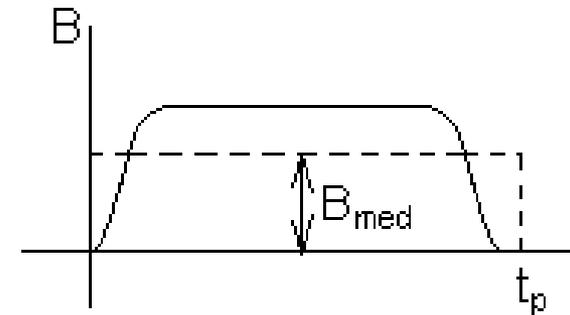
$$\Phi = B_{med} \cdot t_p \cdot l \quad [Wb]$$

$$t_p = \frac{\pi d}{2p} [m]$$

$$v = \frac{\pi D n}{60} [m/s]$$



$$E = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n [V]$$



# Excitación del campo inductor

# Excitación del campo inductor

- a) **Imanes permanentes:** débiles, para pequeñas potencias, no regulables, no permite variar el flujo.
- b) **Electroimanes:** de uso general. Las distintas formas de alimentación dan lugar a distintas máquinas (en cuanto a su funcionamiento, no a su construcción).
- máquinas de excitación independiente;
  - máquinas de excitación propia;
  - máquinas auto excitadas (serie, derivación y compuesta)

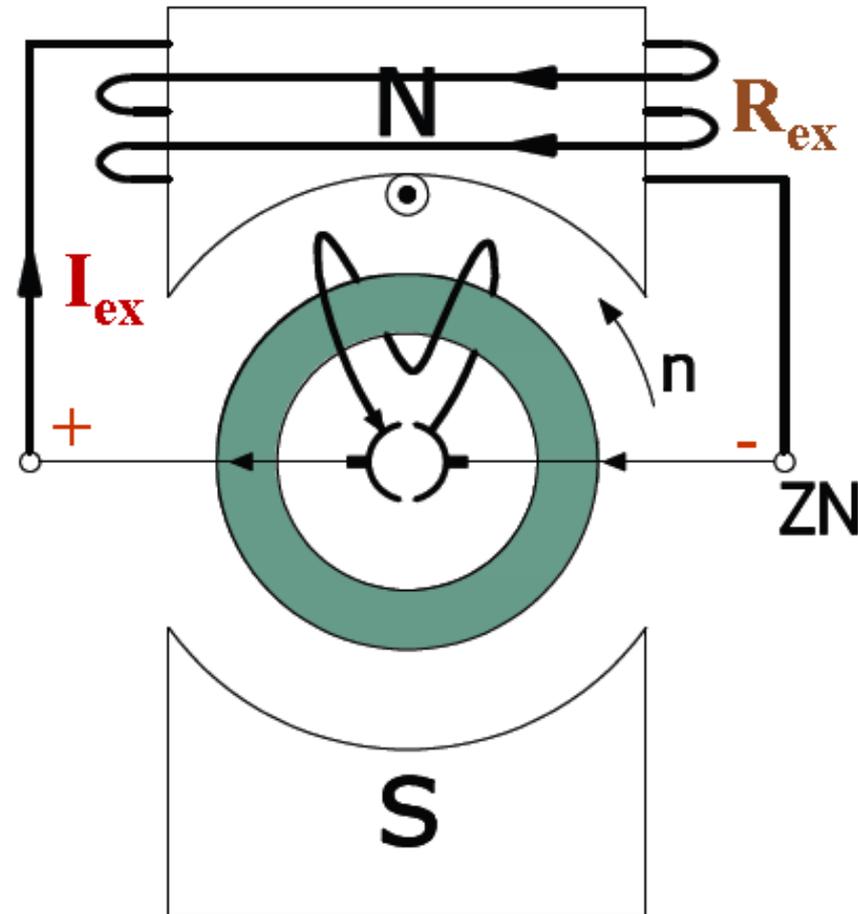
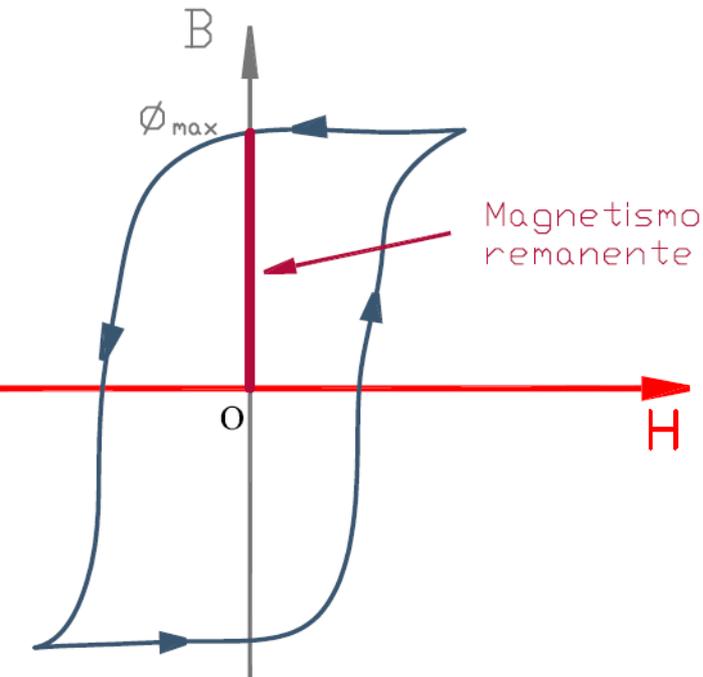
# Principio de auto excitación

- La máquina que gira en sentido antihorario; sus polos tienen un magnetismo remanente considerable:

*La máquina genera por sí sola, al hacerlo girar, debido al magnetismo remanente preexistente.*

- Cuando se establece el equilibrio:

$$E = I_{ex} \cdot R_{ex} [V]$$



# Principio de auto excitación

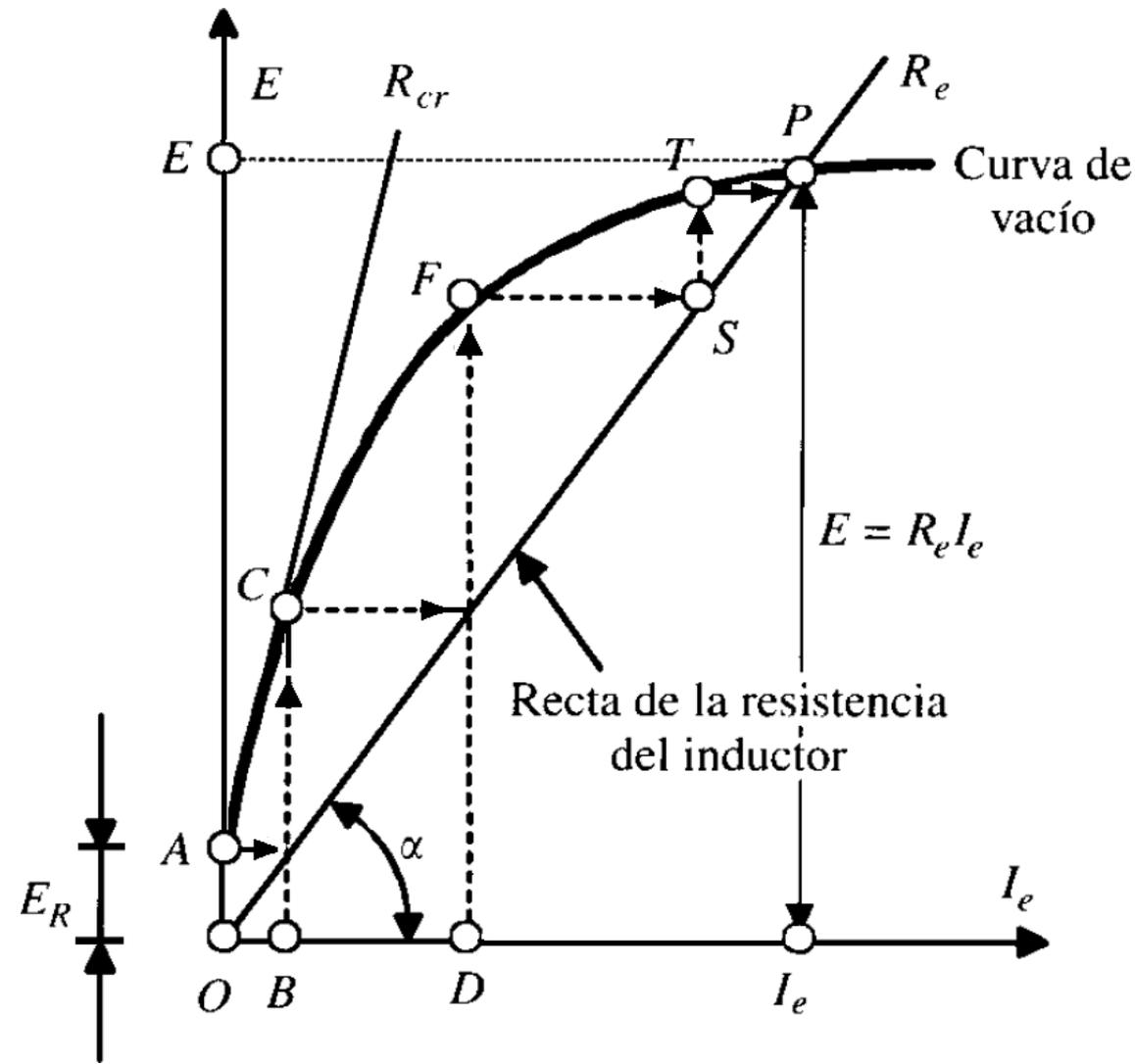
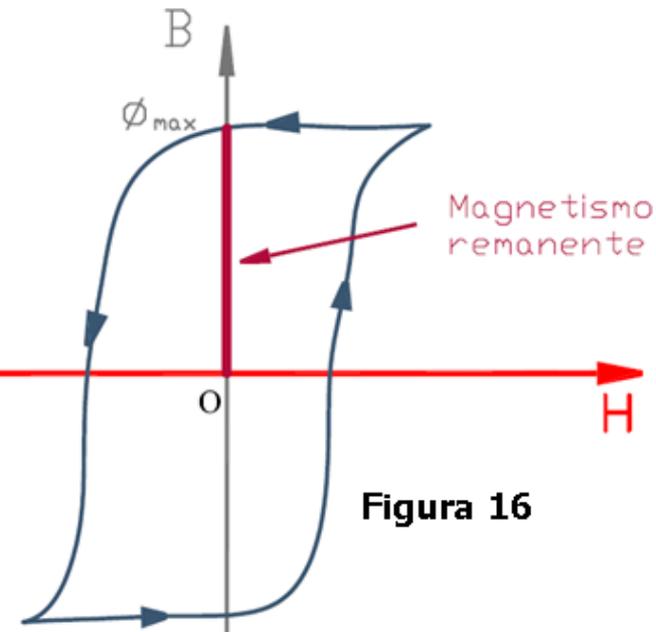
## Consideraciones:

1. Deben concordar el sentido del flujo del arrollamiento excitador con el del magnetismo remanente.
2. Debe haber concordancia entre el magnetismo remanente, el sentido de giro y el sentido del arrollamiento de los polos inductores.

## 3. Causas de no excitación de la máquina:

- a) Falta de magnetismo remanente
- b) Falta de concordancia entre los elementos mencionados en el punto 2°.
- c) En algunas conexiones (derivación) por cortocircuito exterior.
- d) Poca presión en los resortes de escobillas (falso contacto)

# Principio de auto excitación



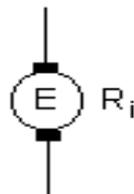
# Formas de conexión

*Distintas conexiones entre excitación e inducido dan lugar a distintas máquinas (en lo funcional).*

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Máquinas con excitación separada | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excitación independiente</li> <li>• Excitación propia</li> </ul>                             |
| Máquinas autoexcitadas           |   |
|                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excitación derivación</li> <li>• Excitación serie</li> <li>• Excitación compuesta</li> </ul> |
|                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corta</li> <li>• Larga</li> </ul>  |

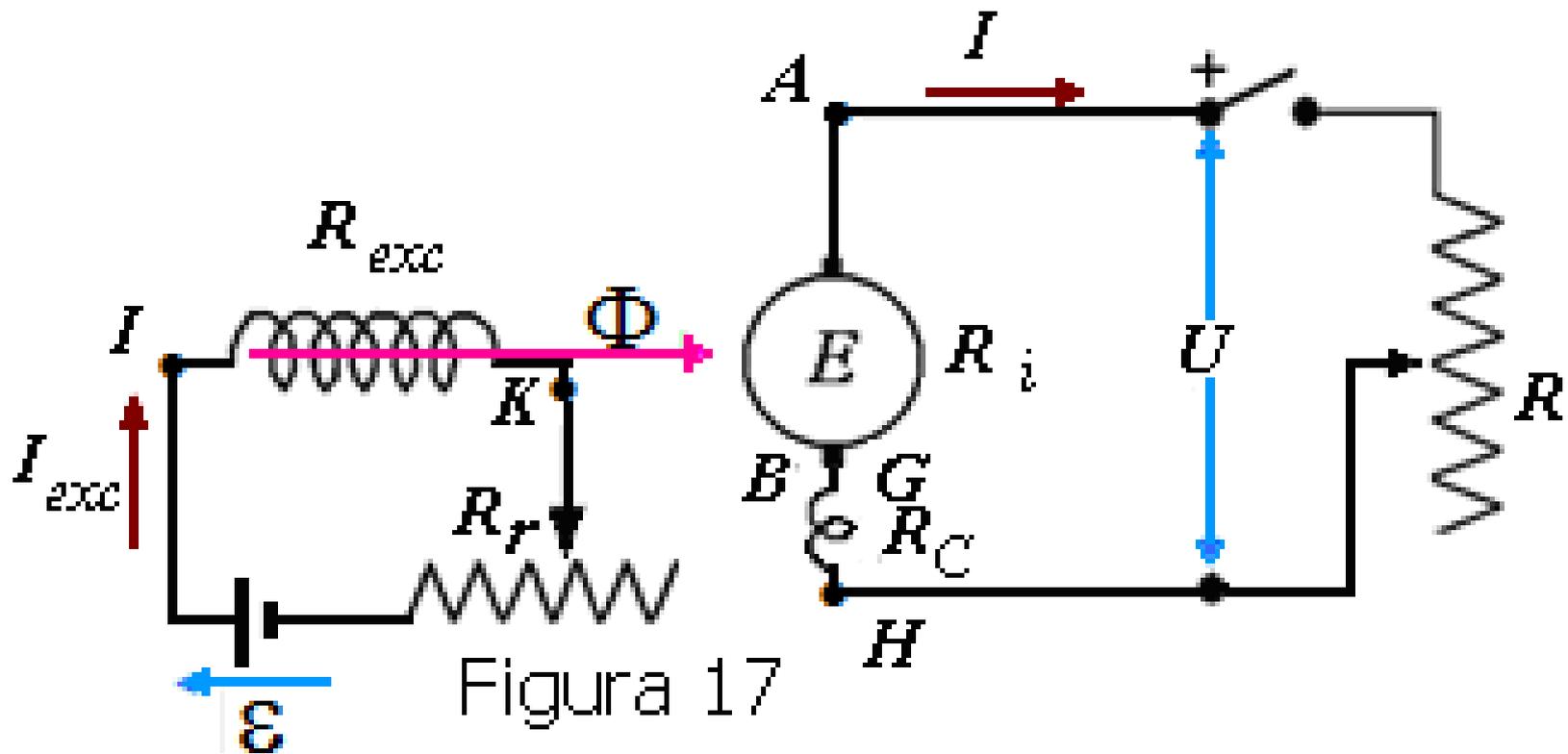
## CIRCUITO EQUIVALENTE

- resistencia de inducido  $R_i$
- fem. que genera  $E$



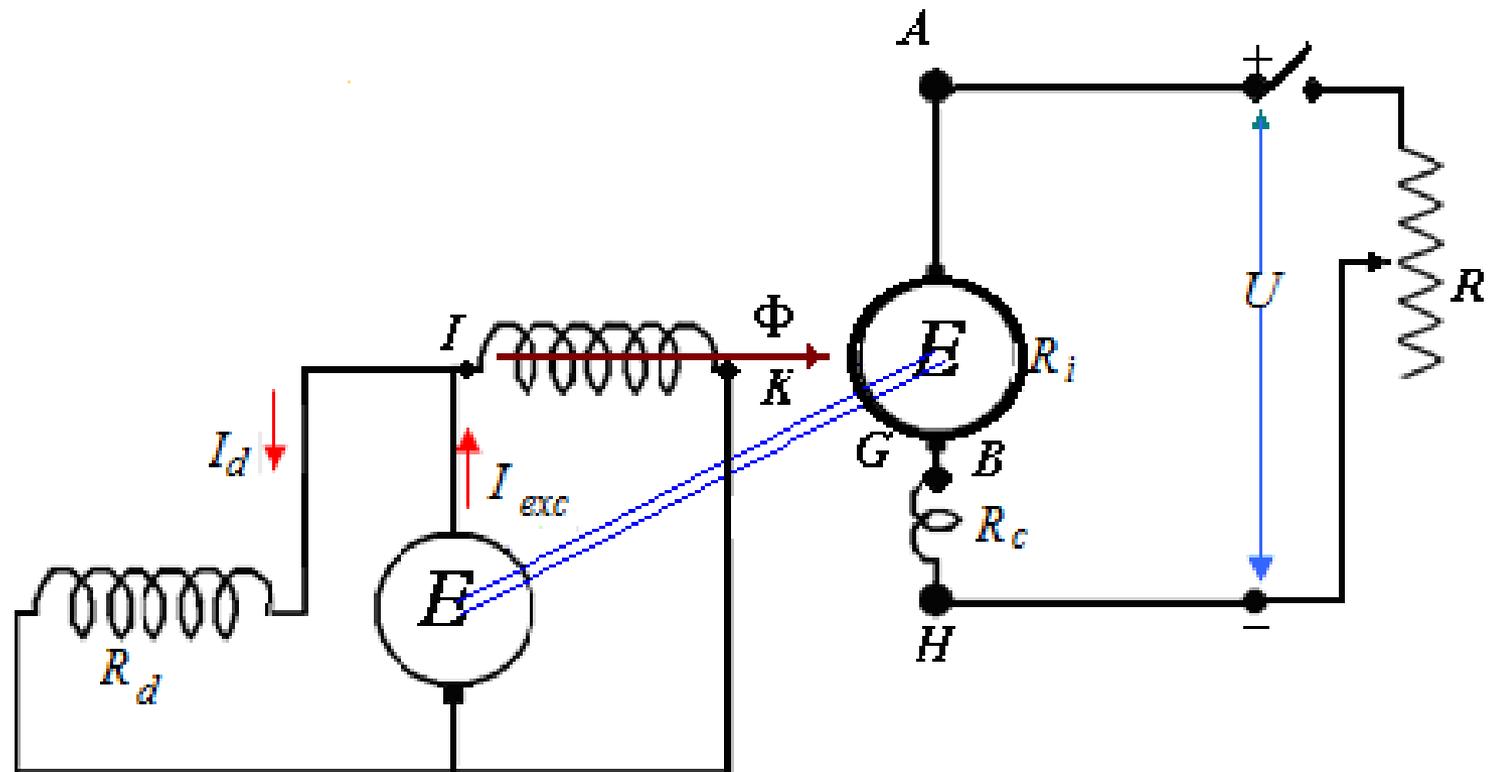
- polos de conmutación  $R_C$
- polos principales  $R_{ex}$ ,  $R_d$ ,  $R_s$

# Generador excitación independiente



$$E = U + (R_i + R_c).I$$

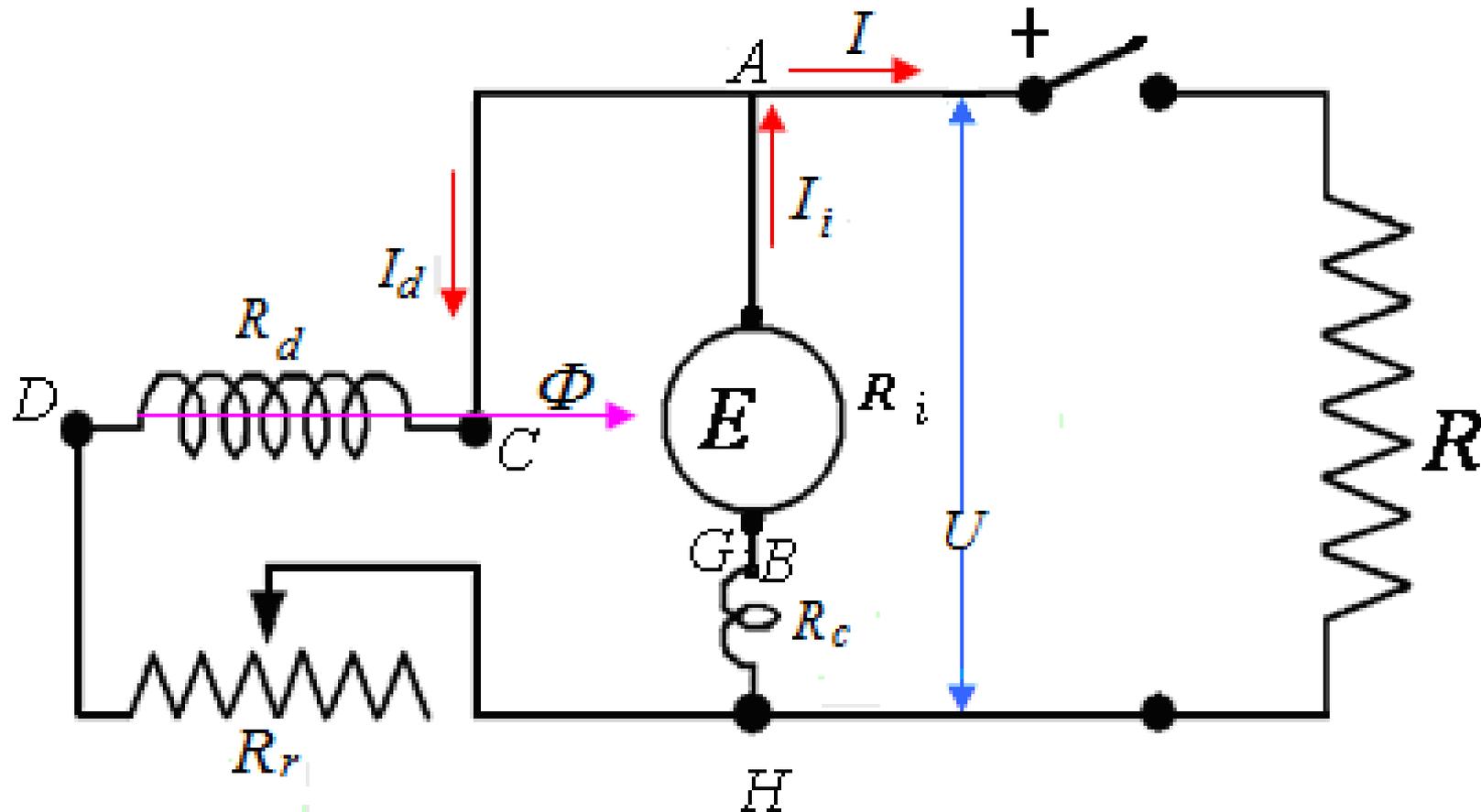
# Generador excitación propia



$$E = U + (R_i + R_c).I$$

Los polos son alimentados por un generador independiente, acoplado al mismo eje, denominado excitatriz. Cuando la excitatriz es muy grande, suele necesitar ser alimentada a su vez, por otra máquina pequeña, llamada excitatriz piloto, también montada sobre el mismo eje

# Generador excitación derivación



$U \angle E$

$$E = U + (R_i + R_c)I_i$$

$$I_i = I_d + I$$

$$U = (R_d + R_r)I_d$$

# Generador excitación serie

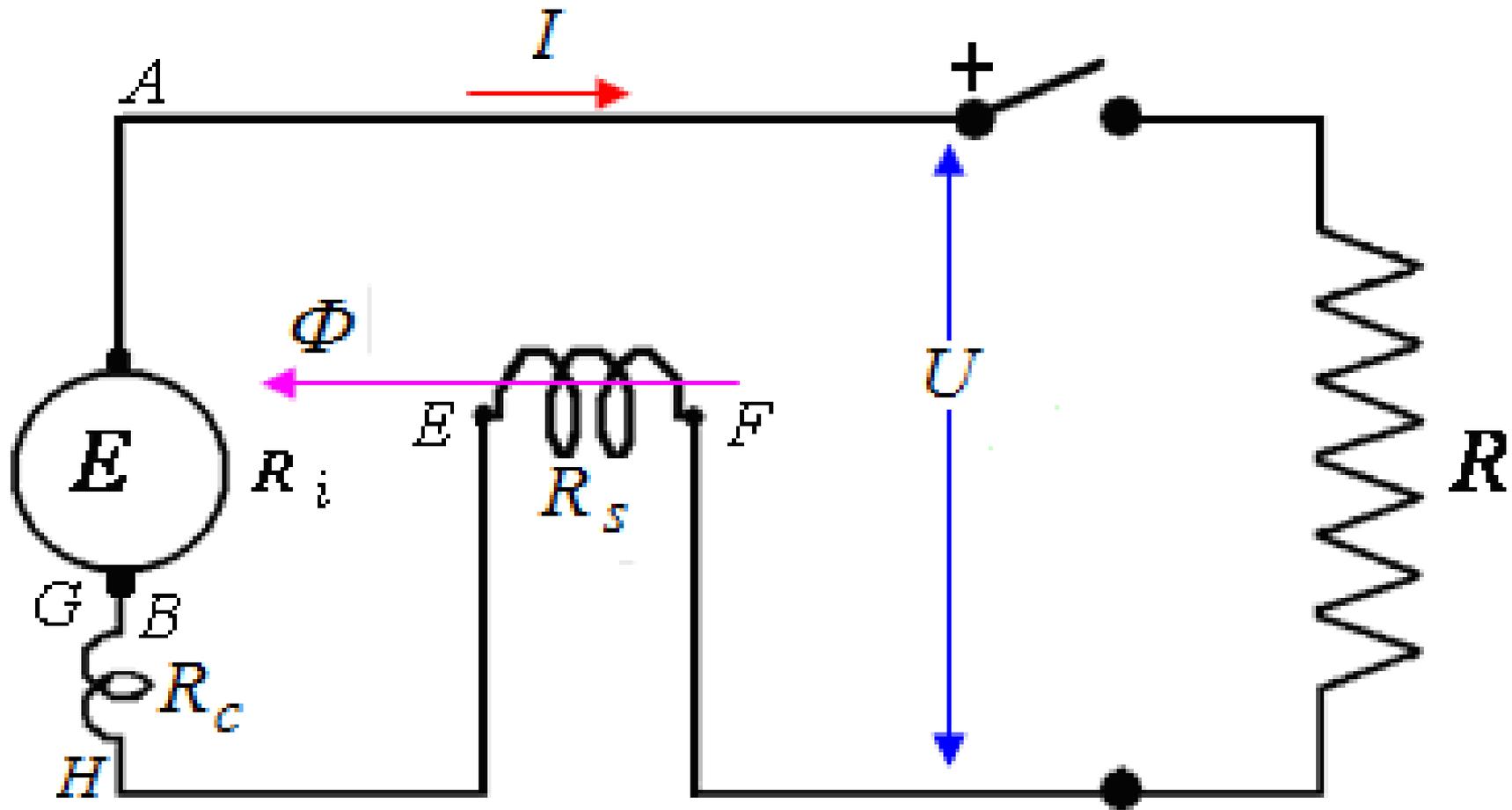
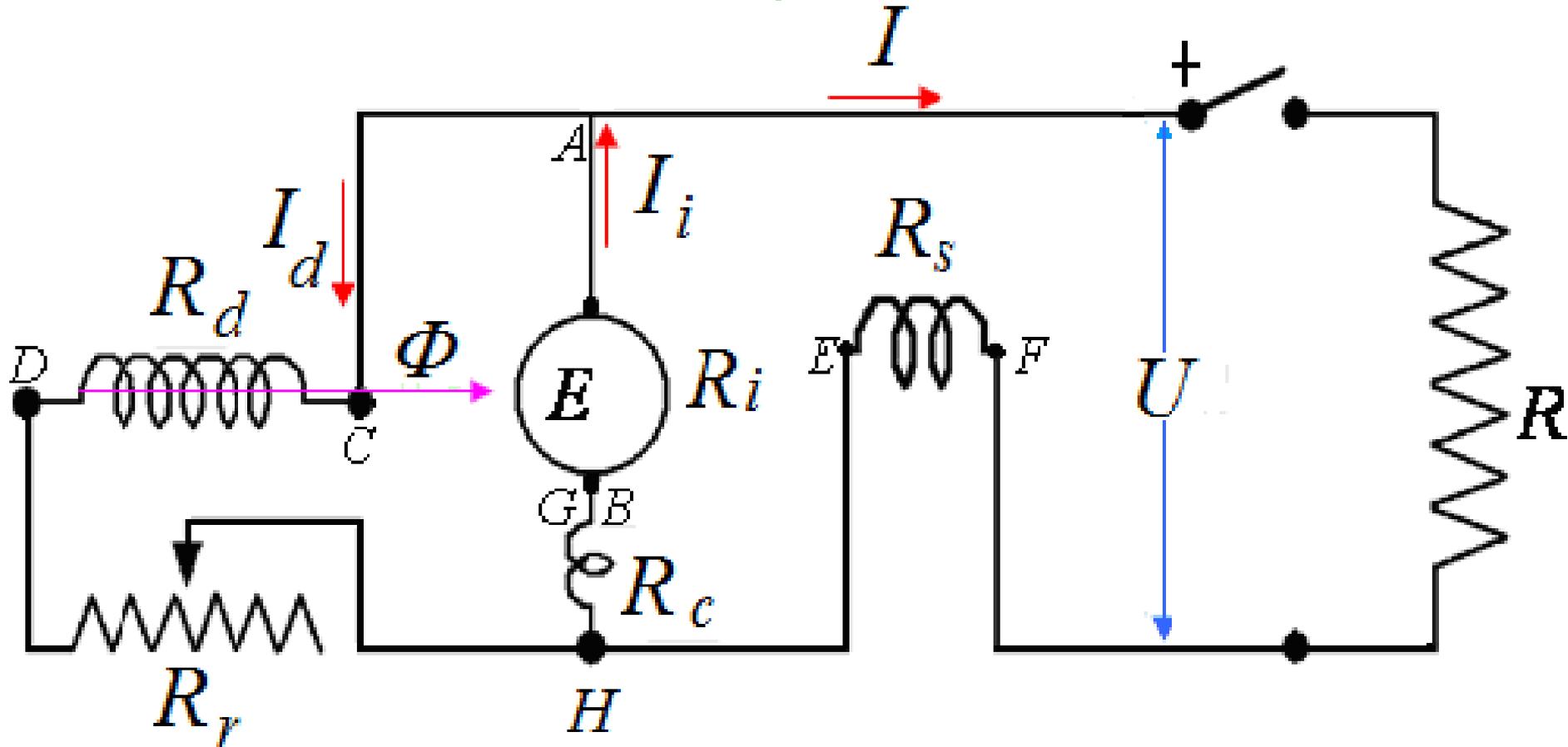


Figura 20

$$E = U + (R_c + R_s + R_i)I$$

## Generador excitación compuesta corta

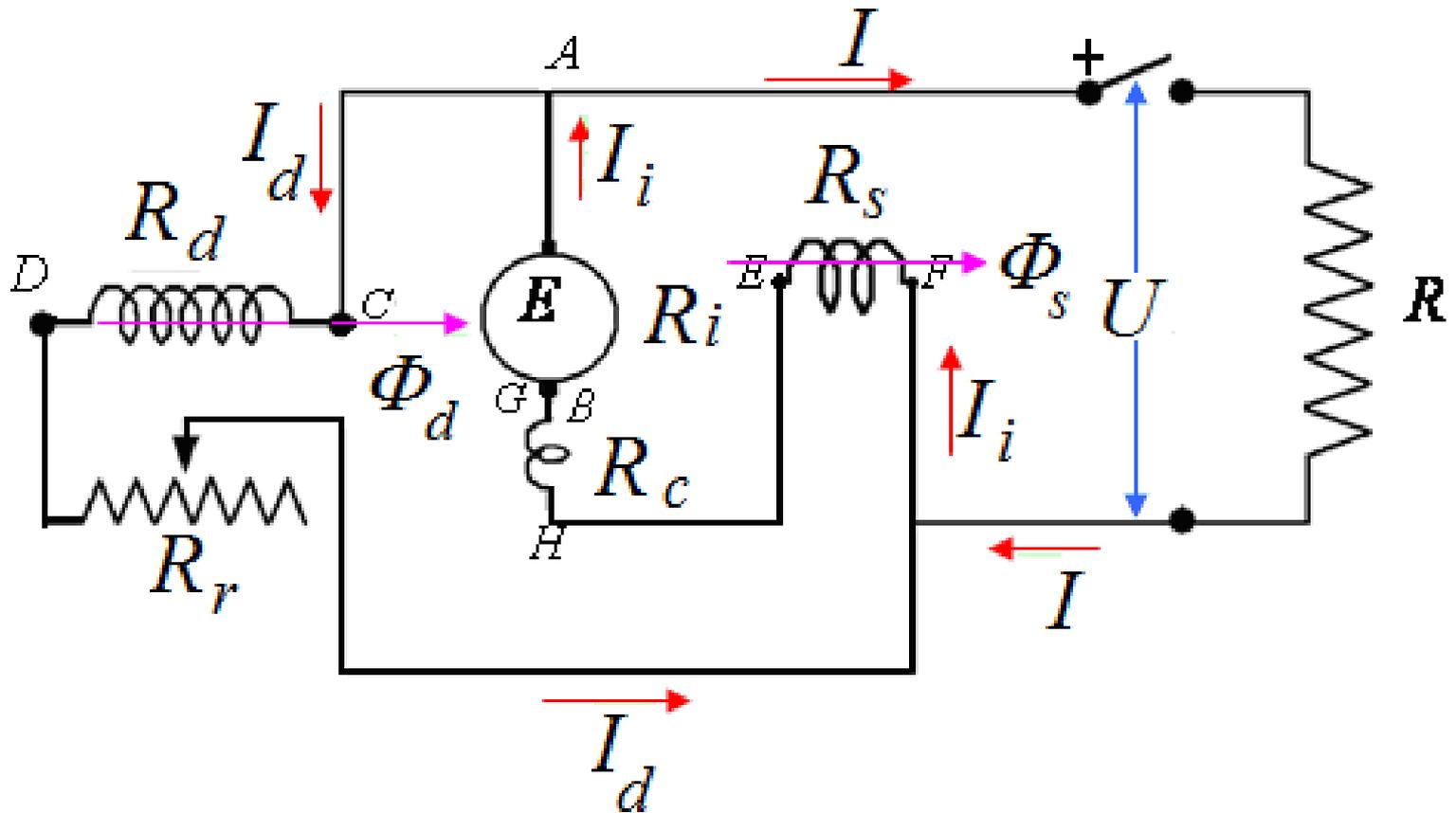


$$I_i = I + I_d$$

$$E = U + R_s I + (R_c + R_i) I_i$$

$$(R_d + R_r) I_d = U + R_s I$$

# Generador excitación compuesta larga

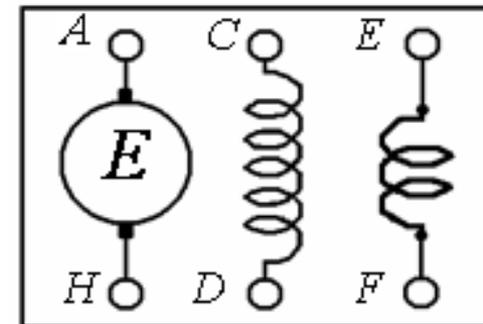


$$U = (R_d + R_r) I_d$$

Figura 22

$$I_i = I + I_d$$

$$E = U + (R_s + R_c + R_i) I_i$$

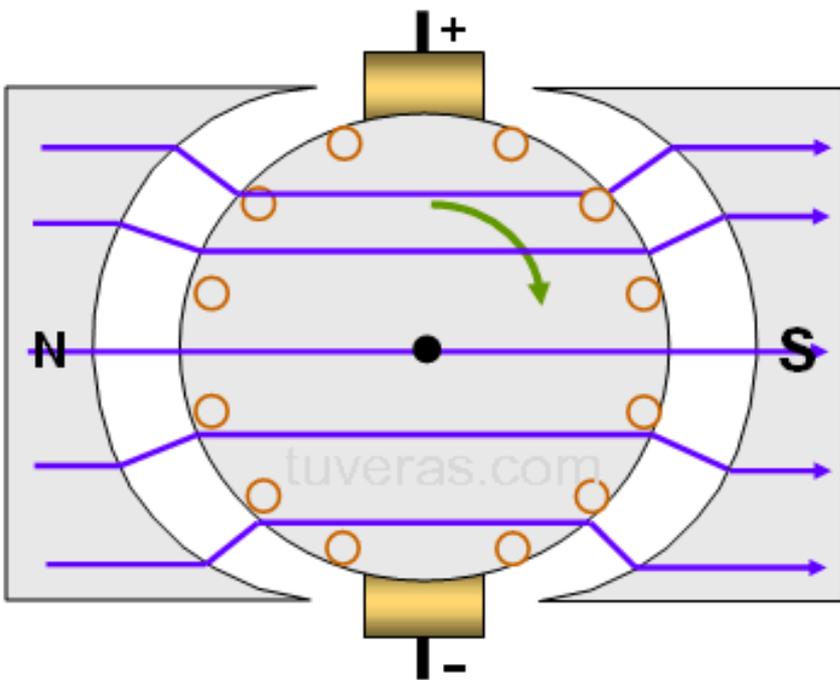


# Reacción del inducido

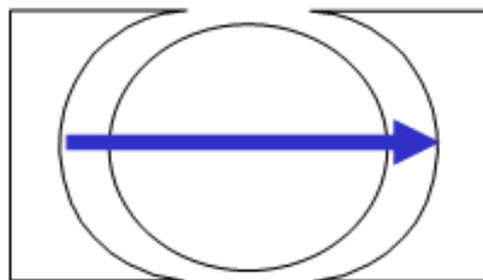
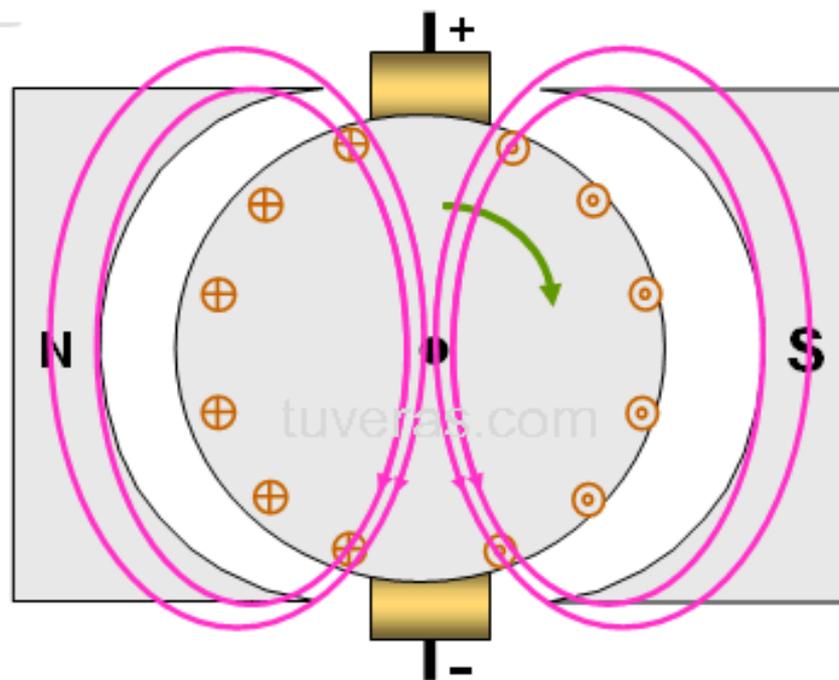


# Reacción del Inducido

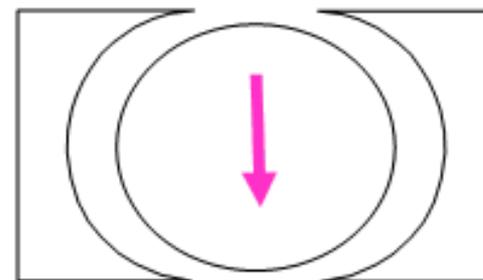
Campo Magnético del Inductor



Campo Magnético del Inducido



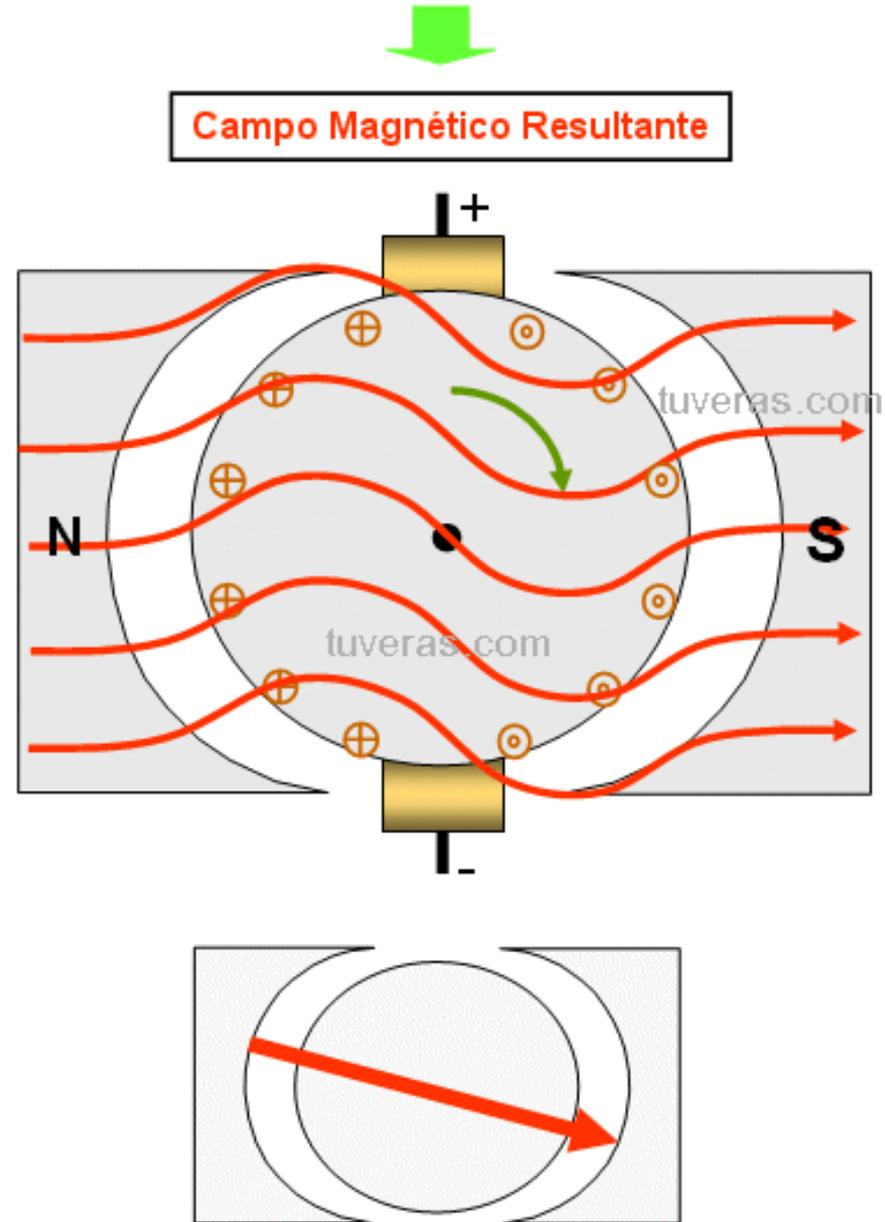
+



tuveras.com

- Reacción del Inducido

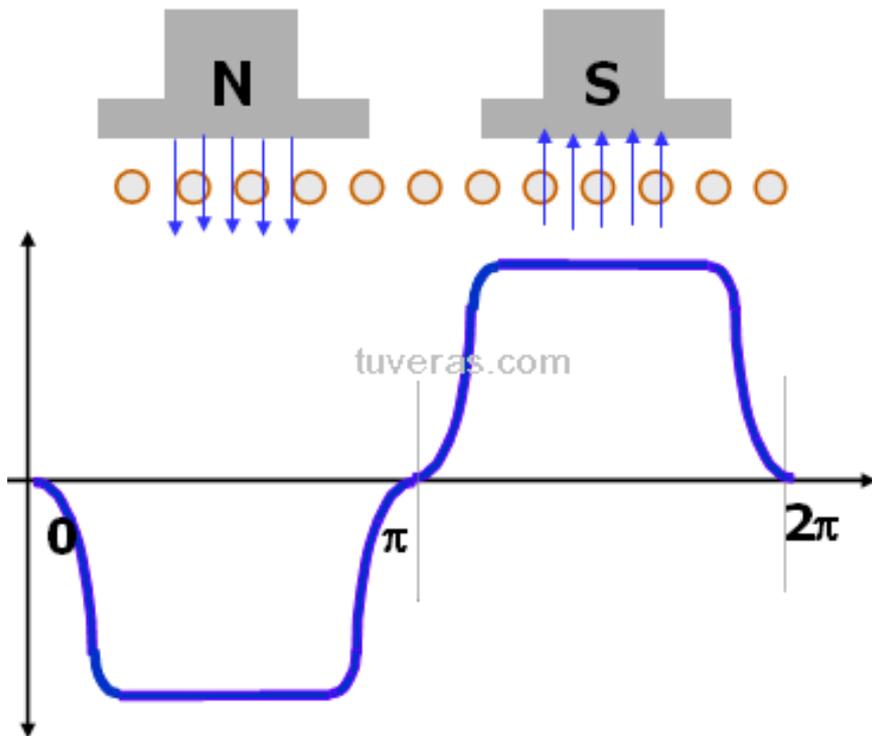
Como cambia la ubicación del flujo resultante debe girarse un cierto ángulo la Línea Neutra Eléctrica (LNE), con el objeto de que la conmutación se realice cuando los conductores se mueven paralelamente a las líneas de inducción.



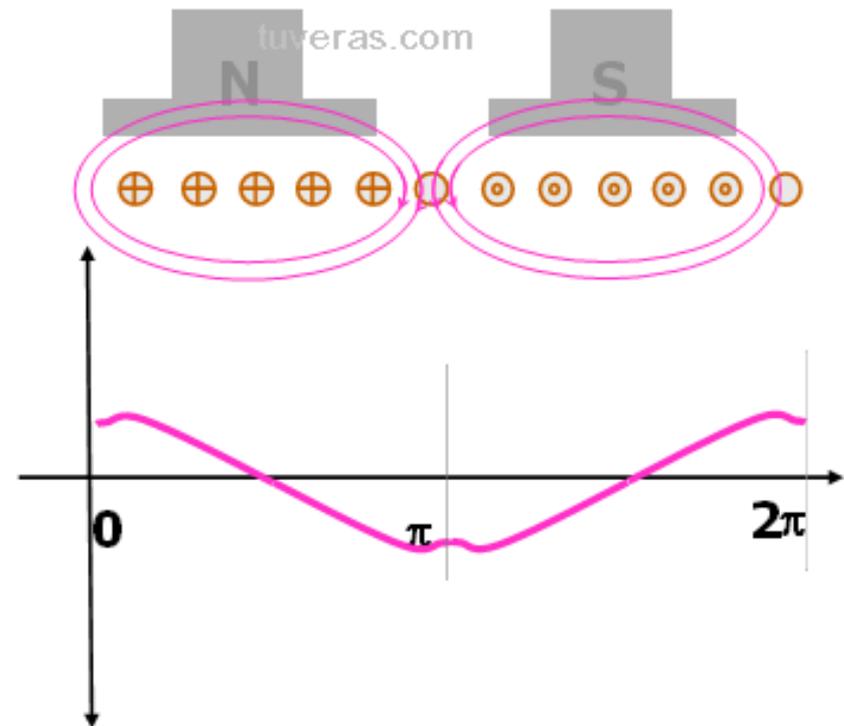
## • Reacción del Inducido

Si hacemos una representación gráfica del campo magnético en función del ángulo:

Campo Magnético del Inductor

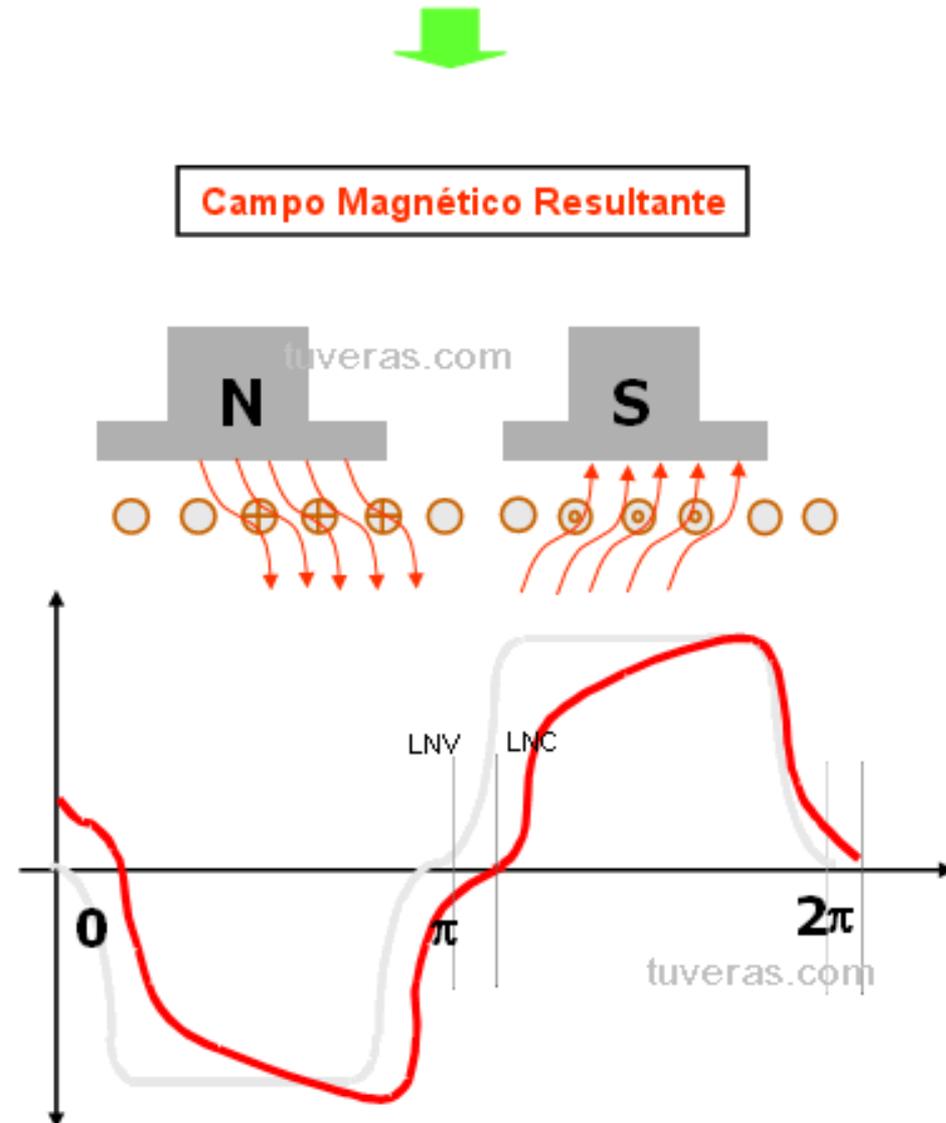


Campo Magnético del Inducido

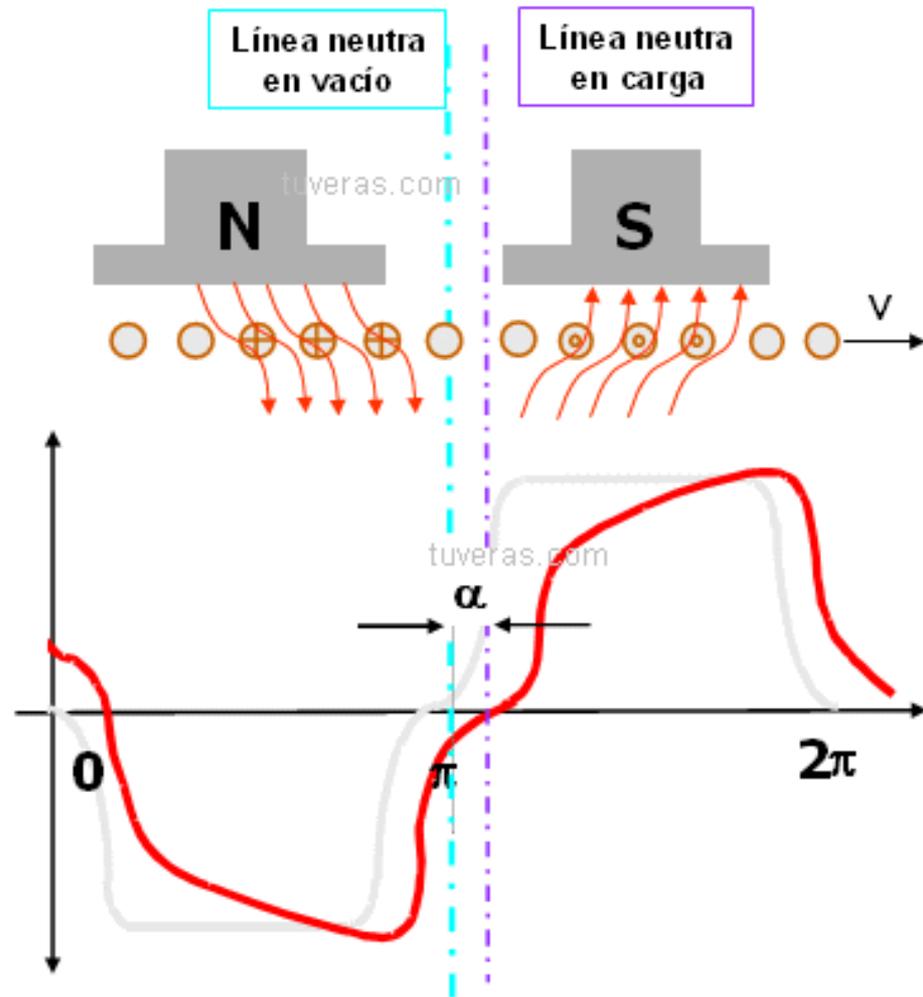
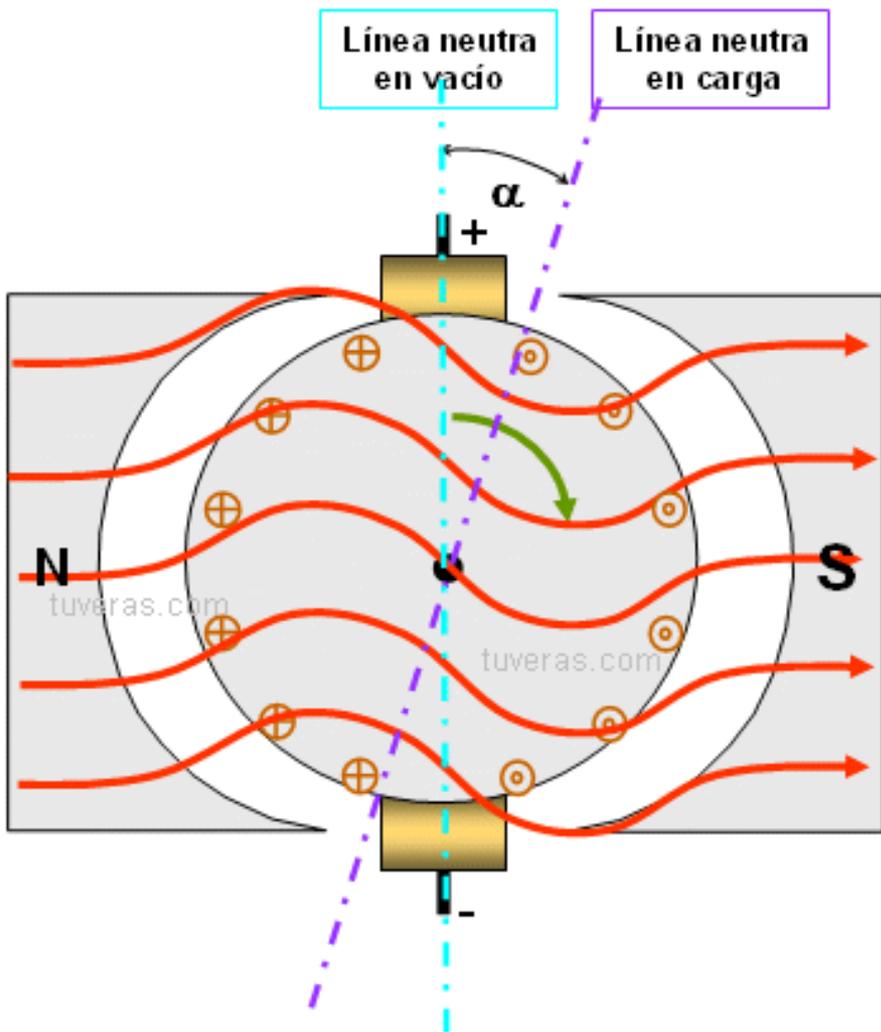


## • Reacción del Inducido

A consecuencia de la reacción del inducido la línea neutra (línea que une los conductores que no producen fem) en carga, adelanta respecto del sentido de giro un ángulo  $\alpha$ , tomando como referencia la línea neutra en vacío.



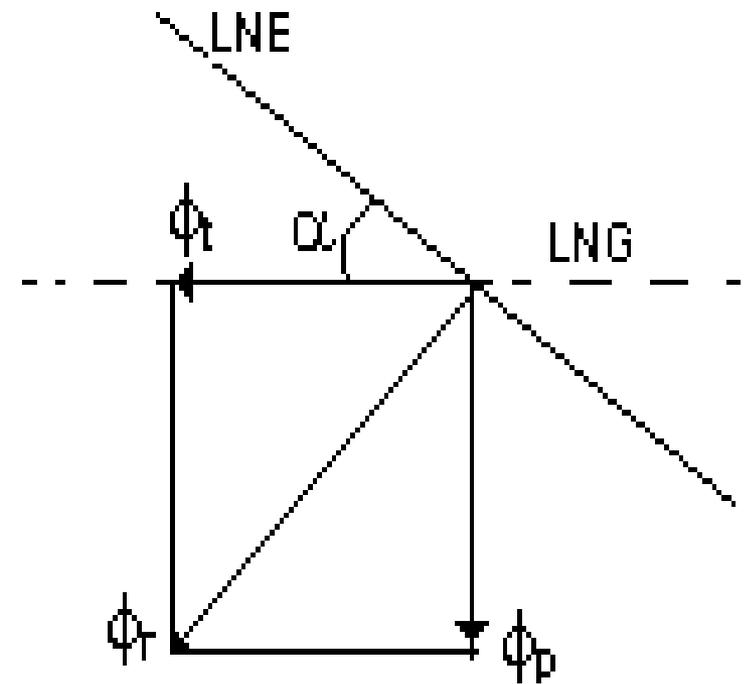
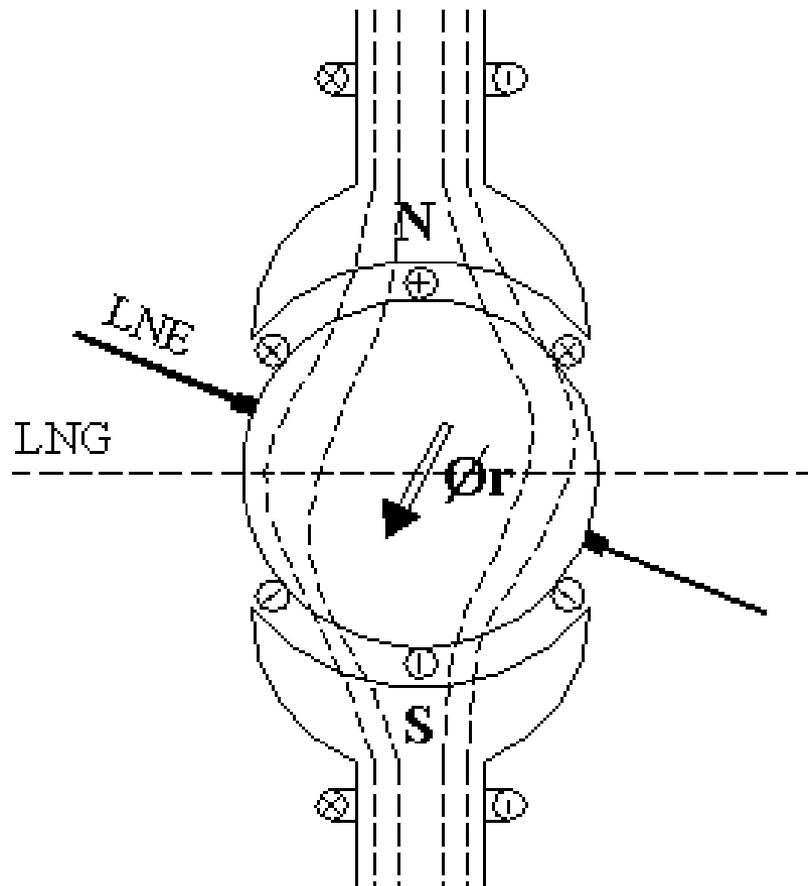
- Reacción del Inducido



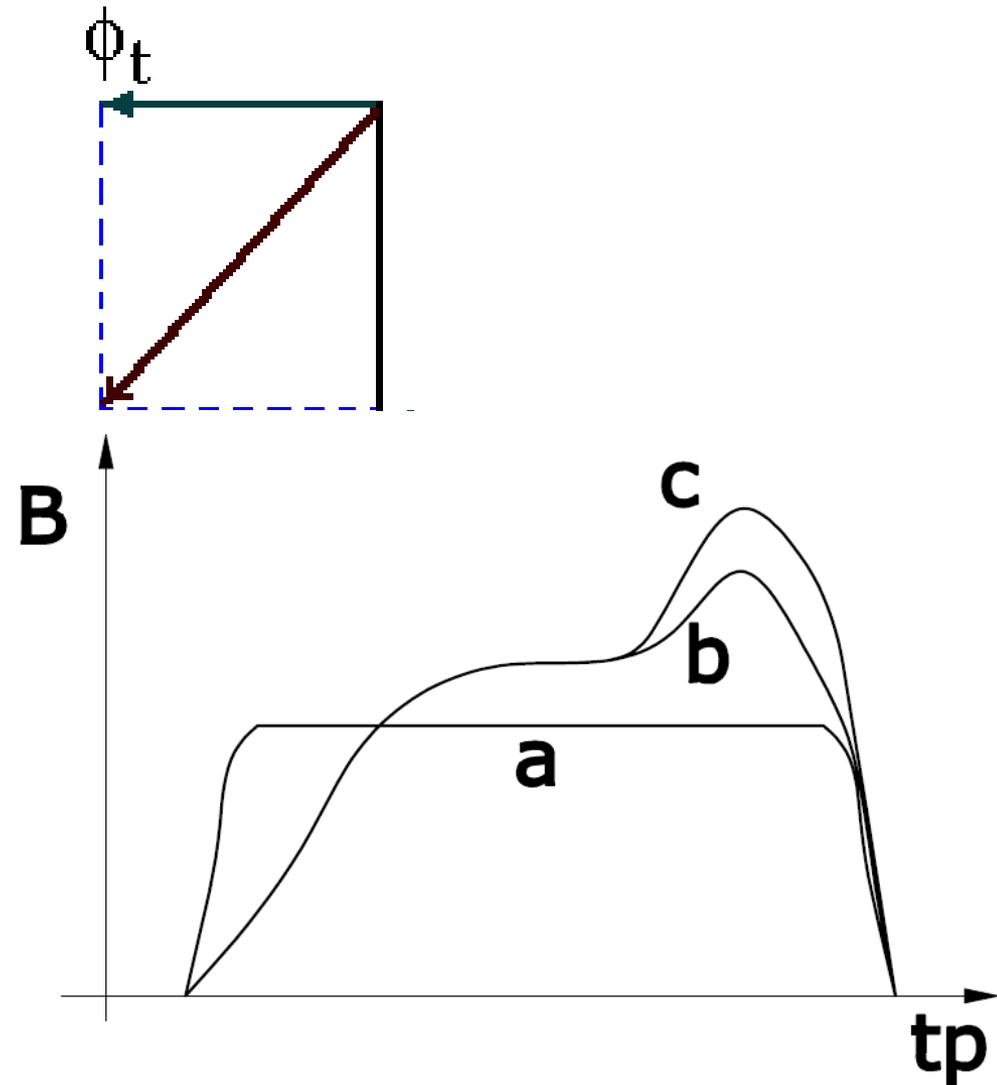
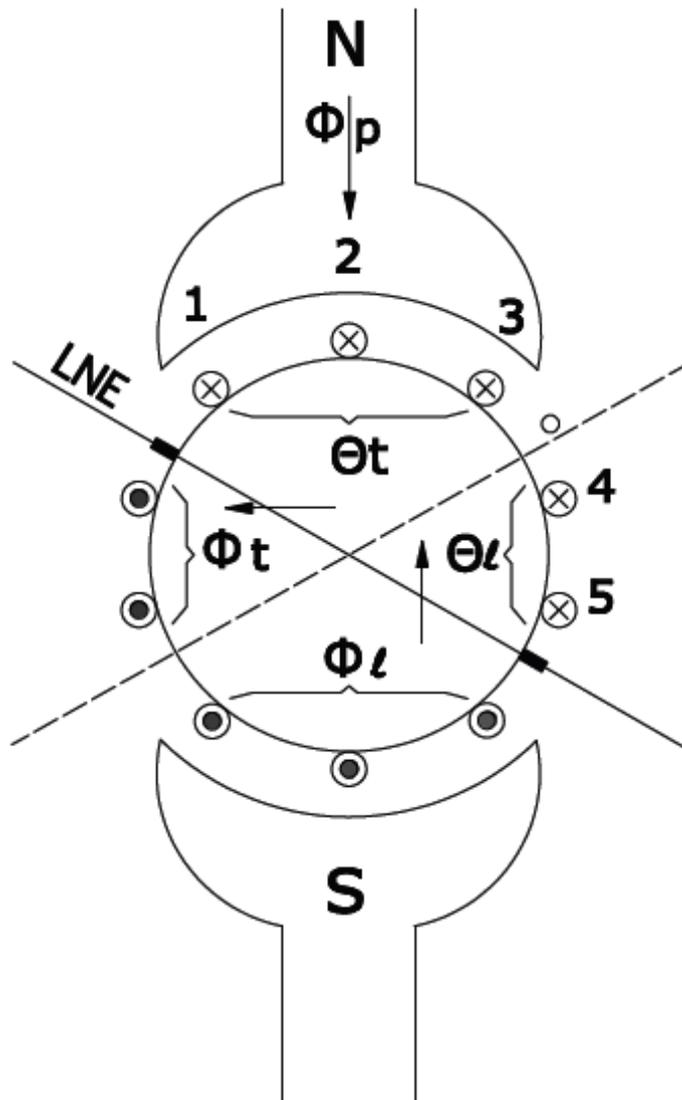
## Inconvenientes de la Reacción del Inducido

- Disminuye la fem en carga  $E$
- Disminuye indirectamente el rendimiento (se debe aumentar la corriente de excitación para compensar el efecto anterior)  $\Rightarrow$  aumentan las Pérdidas de Joule y  $\Rightarrow$  disminuye el rendimiento
- Aumenta las dificultades para realizar una buena conmutación
- Crea peligro de chispas en el colector

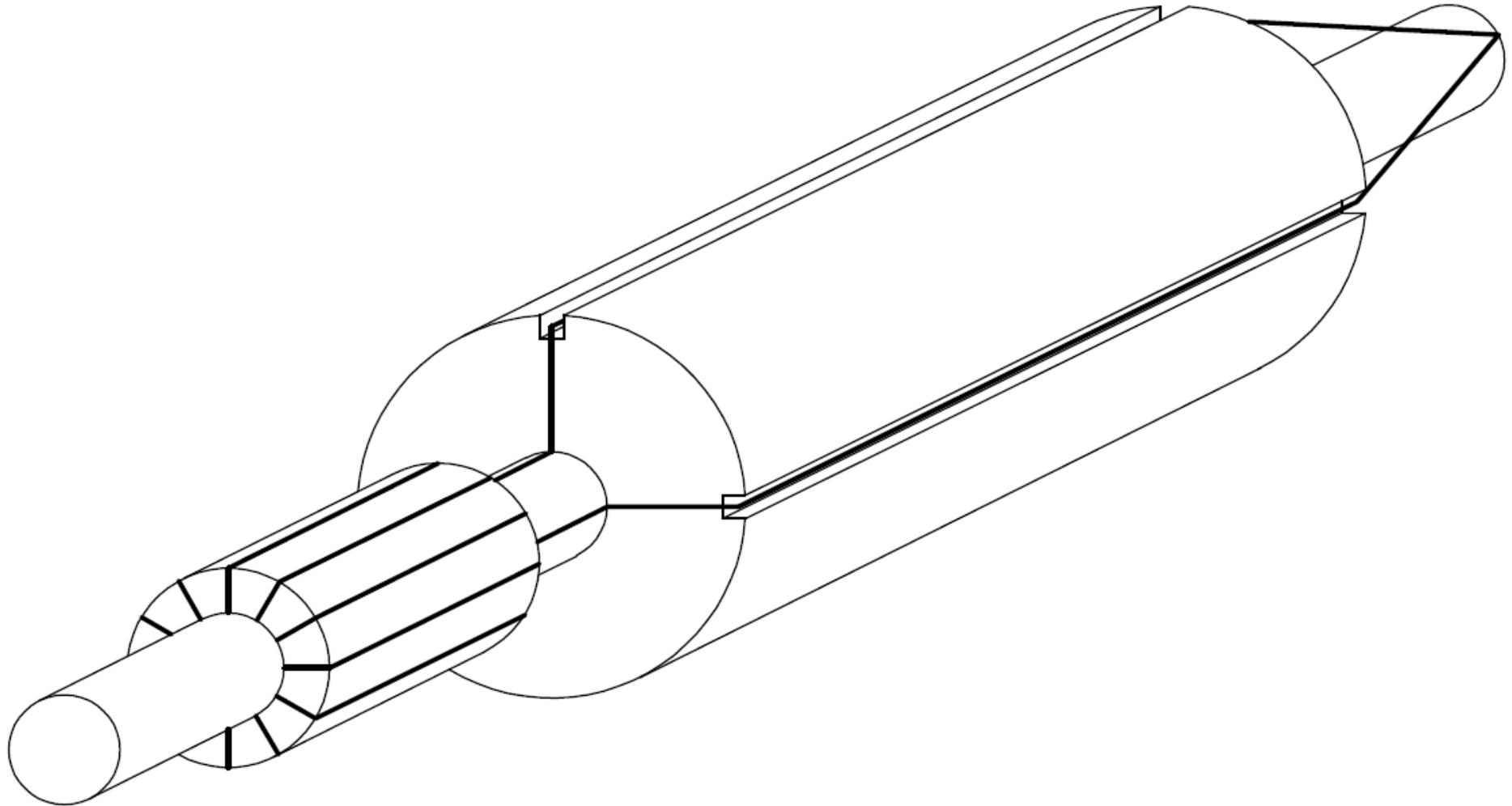
# Reacción del Inducido



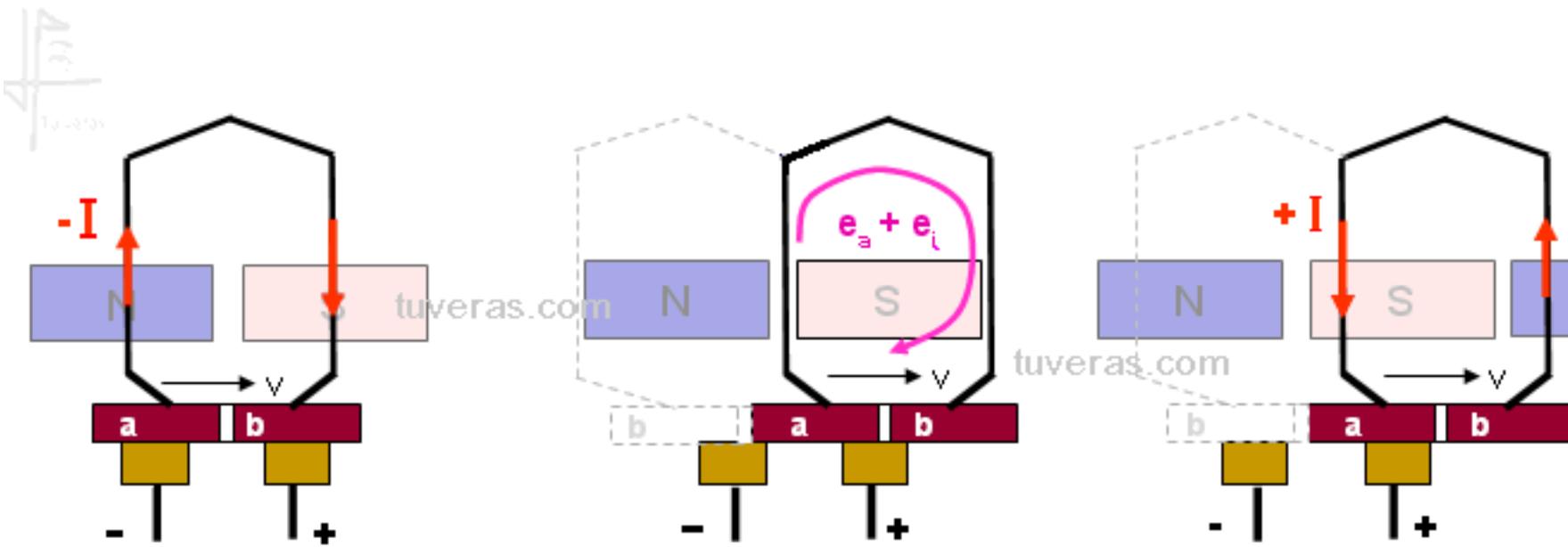
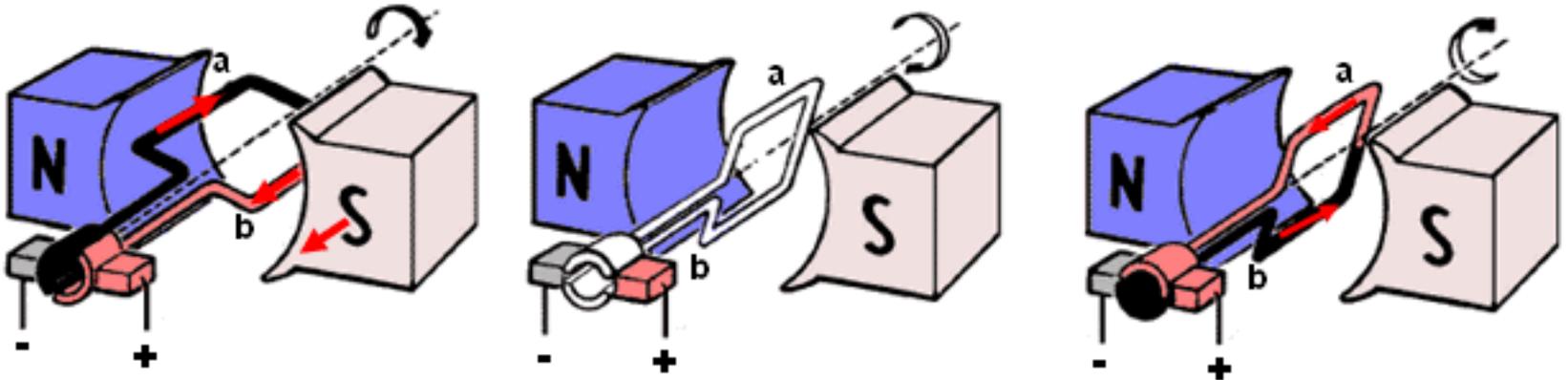
# Consecuencias de la reacción de inducido



# Conmutación



# • Conmutación

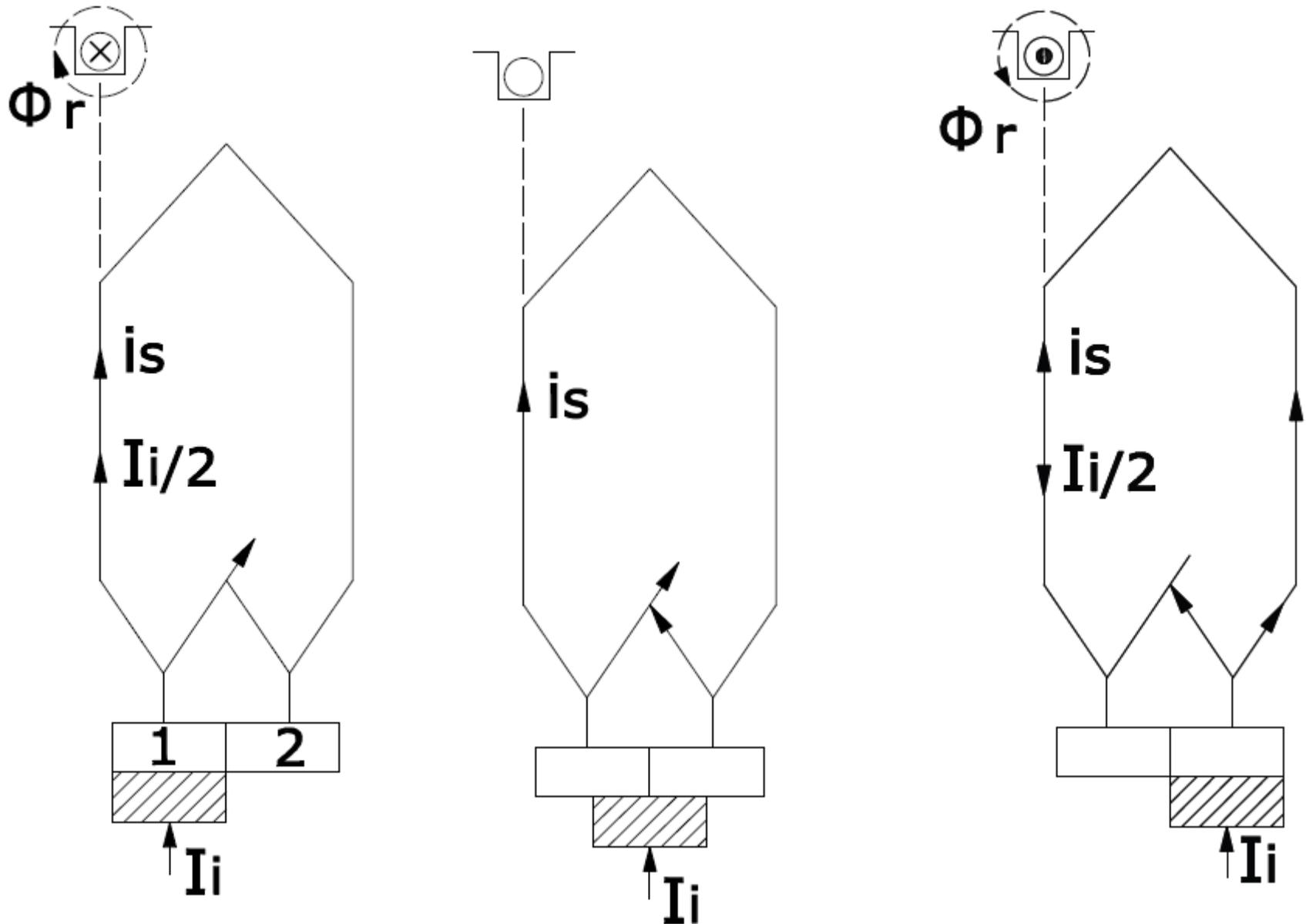


Conductor con  $-I$

Sección en **conmutación**

Conductor con  $+I$

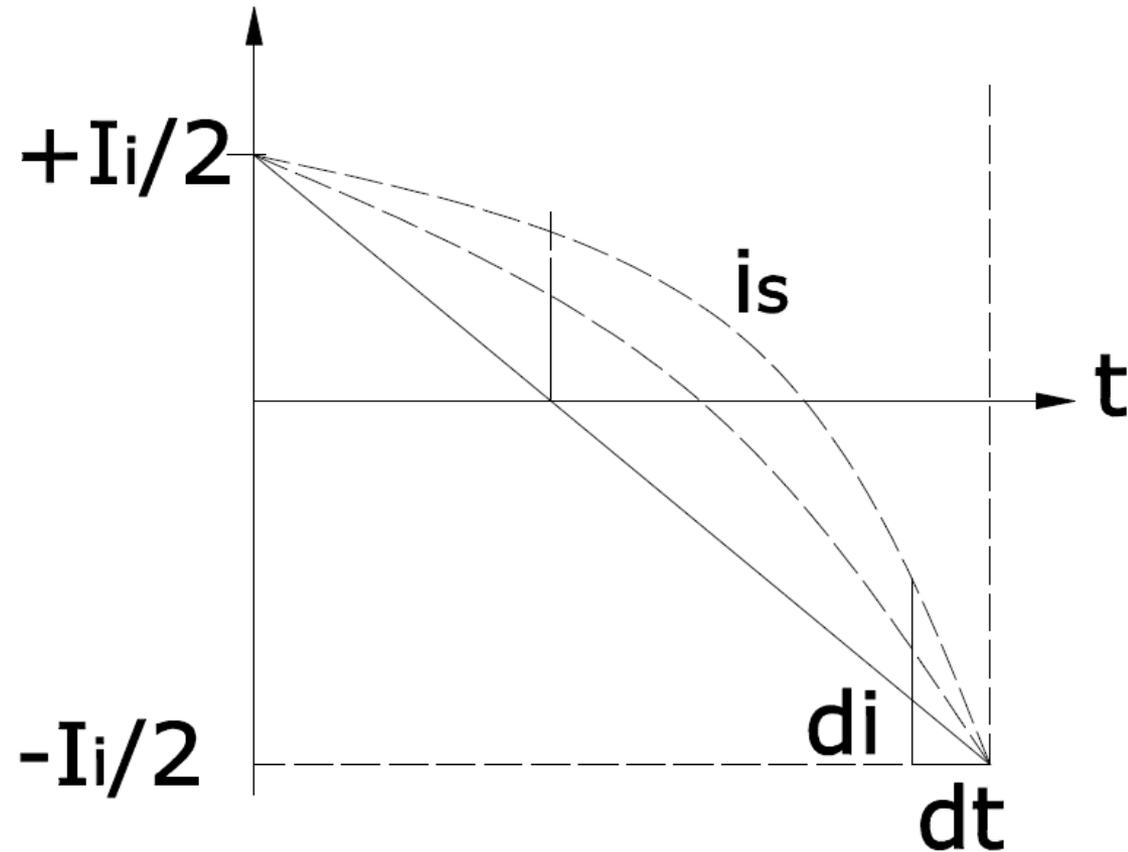
# Fenómeno de Conmutación



# Fenómeno de Conmutación

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt} ; \quad L = N^2 \cdot \Lambda \Rightarrow N \downarrow$$

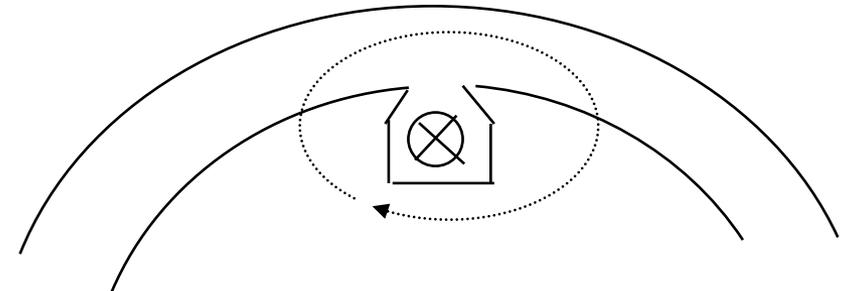
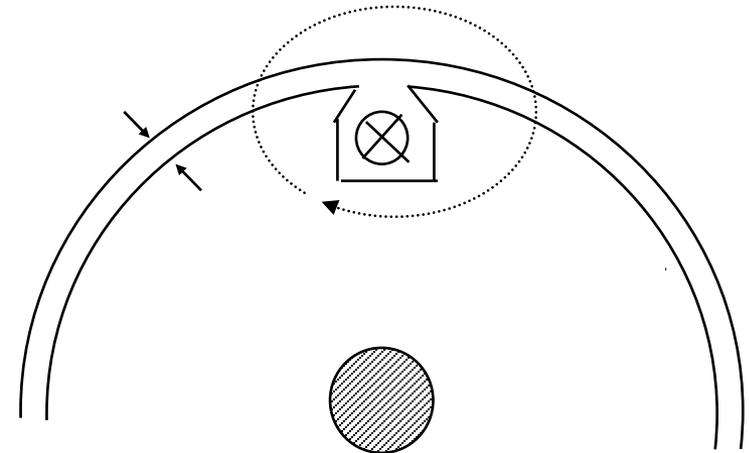
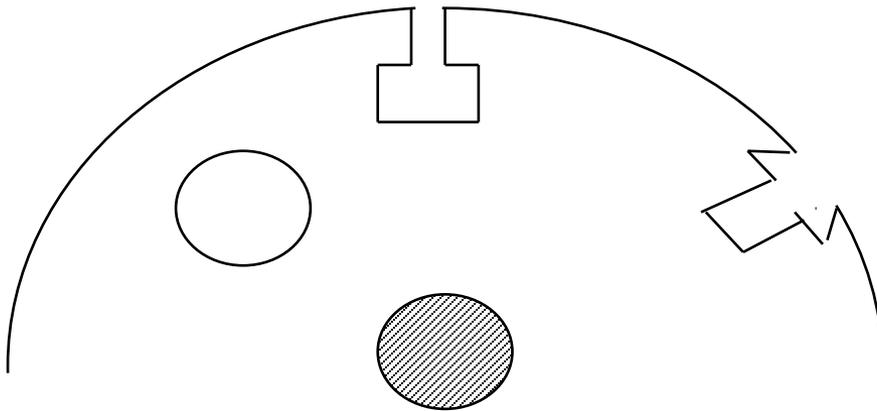
$$e = -\frac{d\phi_r}{dt} ; \quad \phi_r = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R}} \Rightarrow \mathfrak{R} \uparrow$$



# SOLUCIONES POSIBLES

## ranuras abiertas

entrehierros grandes

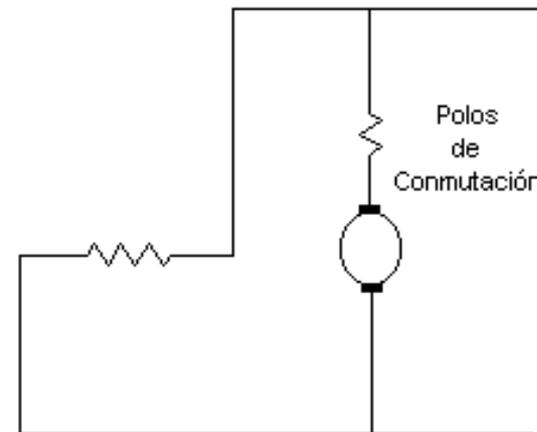
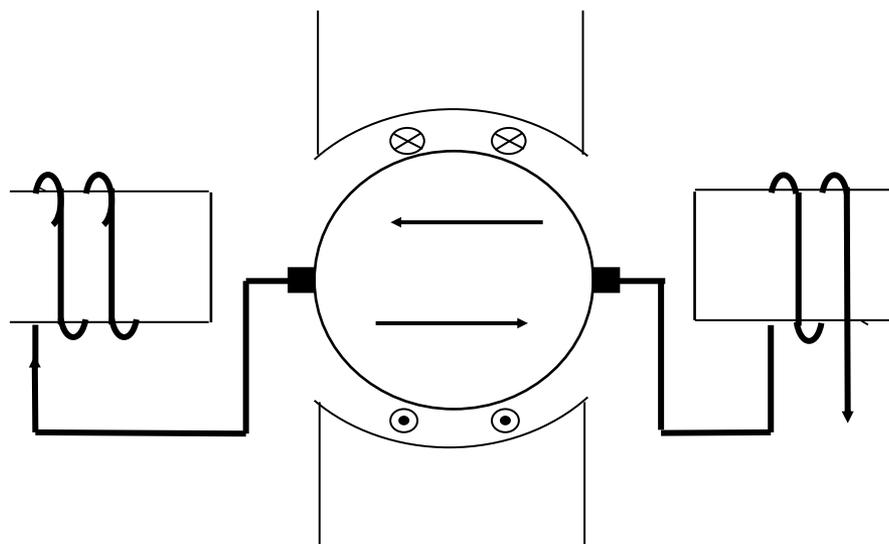


Muchas bobinas pero, de pocas espiras N

# Conmutación

## Soluciones posibles

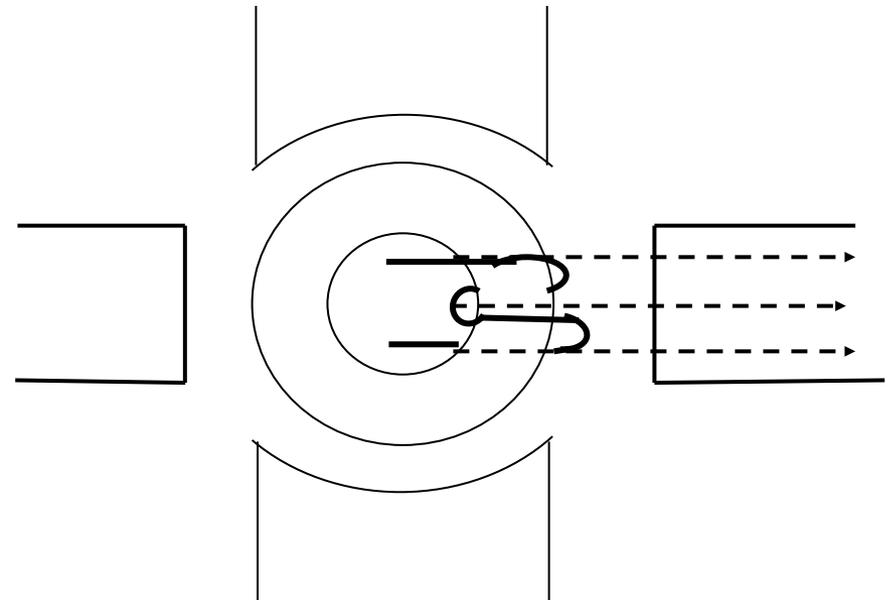
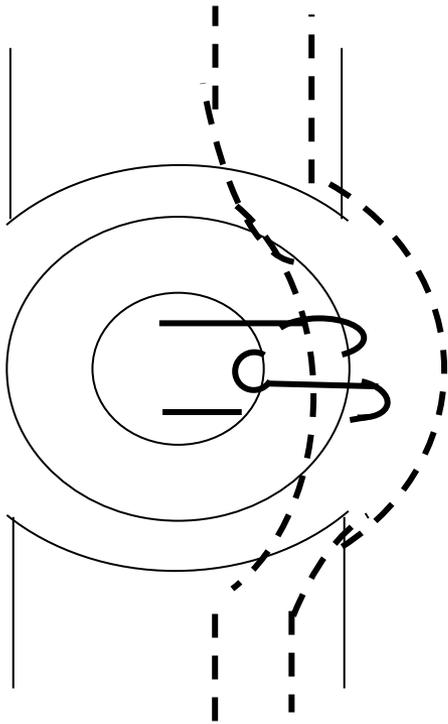
### Polos de Conmutación



# Conmutación

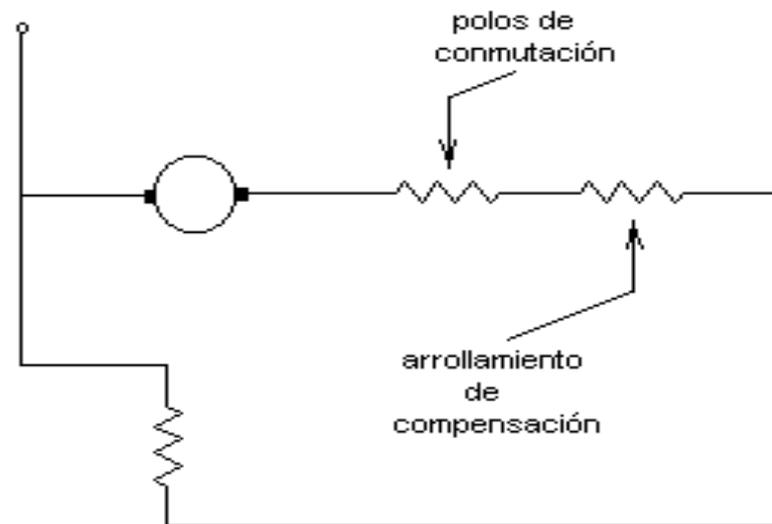
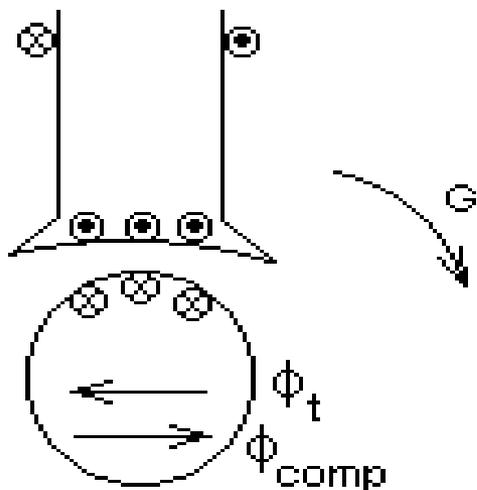
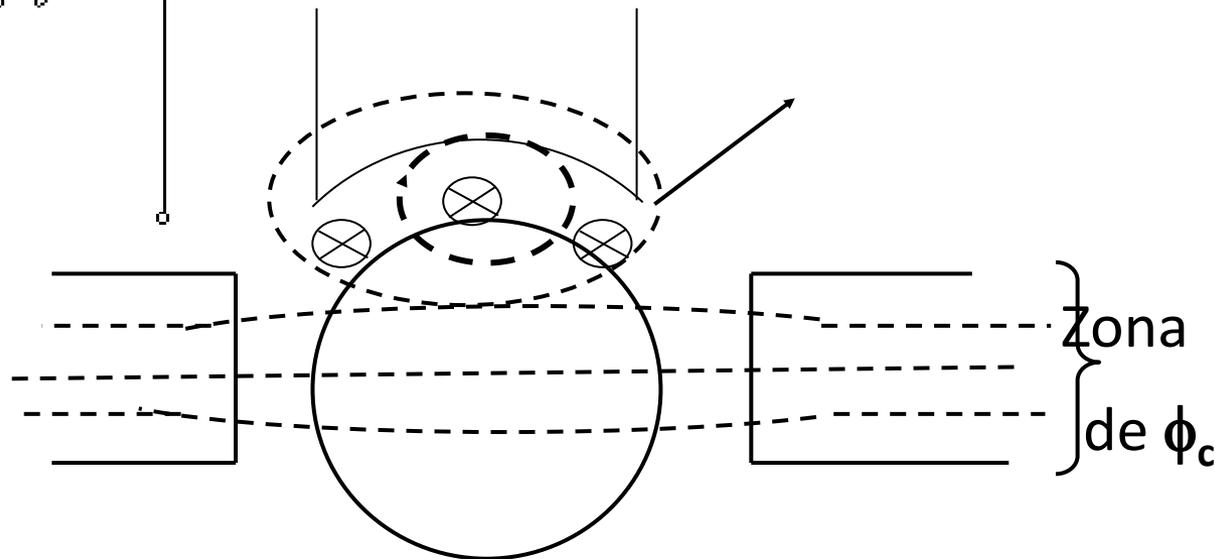
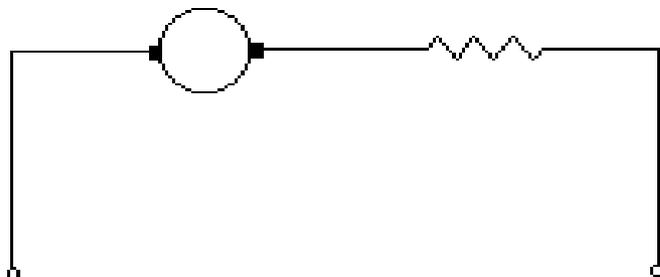
otra alternativa

fem de conmutación

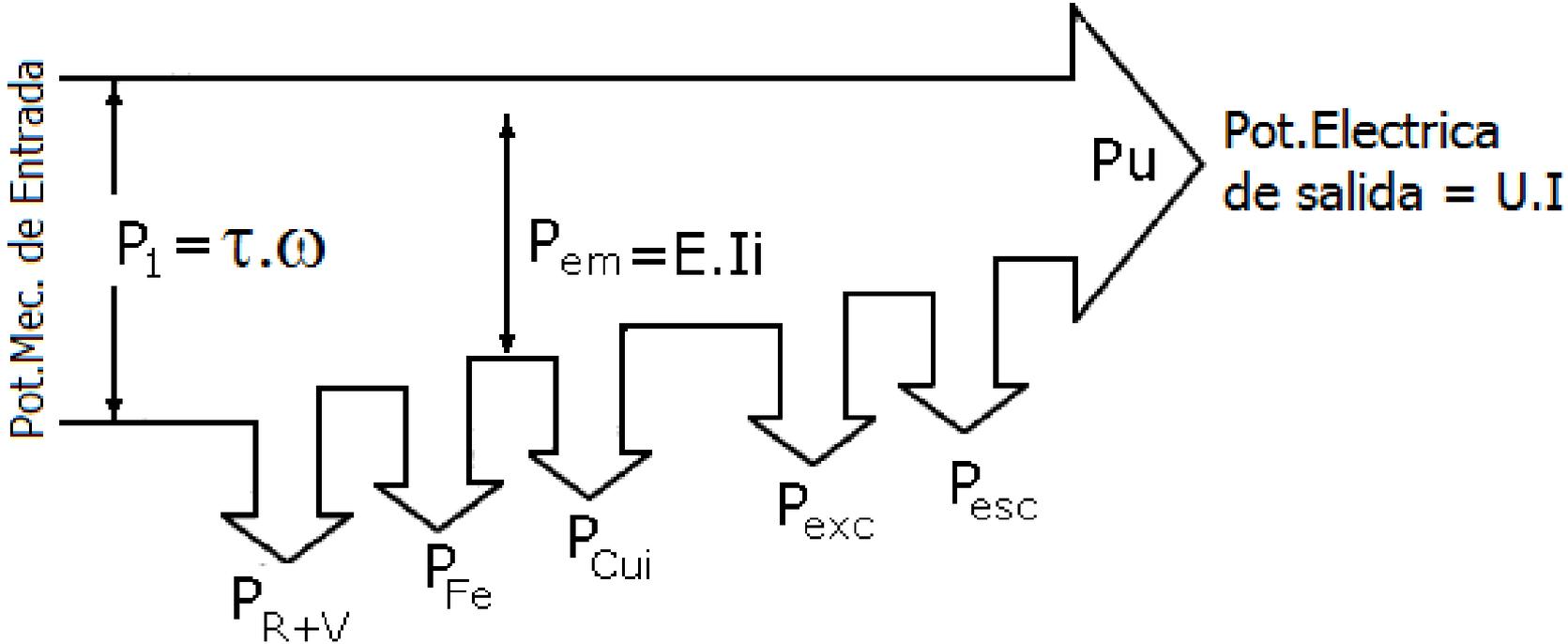


# Conmutación

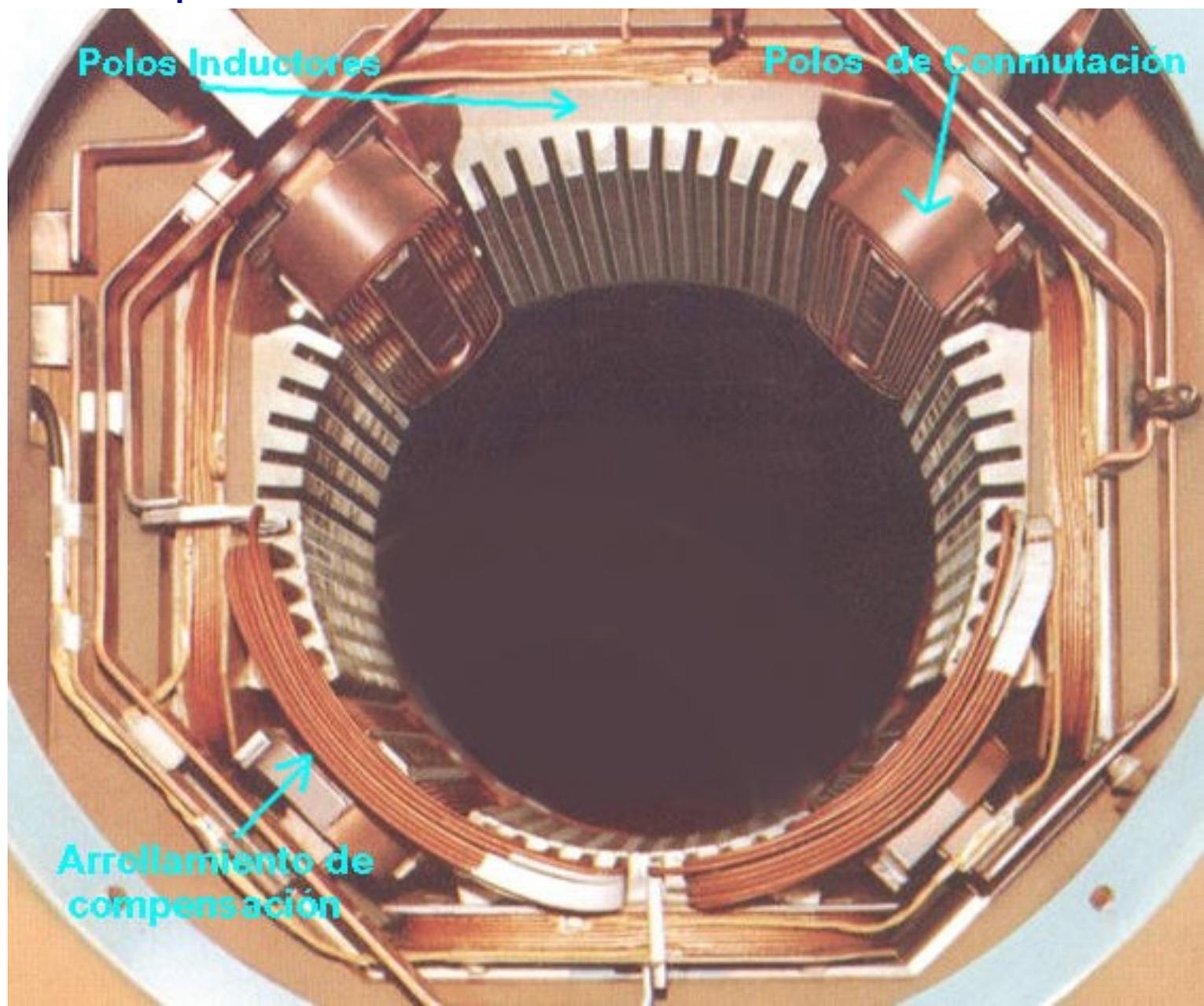
# Bobinado Compensador



# Balance de Energías y rendimiento del Generador



- Arrollamiento Compensador



# Características de funcionamiento

- **Característica magnética:**  $\Phi = f(\theta)$ , relaciona las variaciones de flujo, en función de la fmm. A velocidad  $n = \text{cte.}$  Y corriente de carga  $I = \text{cte.} = 0$
- **Características en vacío:**  $E = f(I_{ex})$  relaciona las variaciones de Fem. en función de la excitación, a  $n = \text{cte}$  e  $I = \text{cte.} = 0$
- **Característica en carga:**  $U = f(I_{ex})$ , variación de tensión en función de corriente de excitación, a  $n = \text{cte}$  y corriente de carga  $I = \text{cte} = I_1$
- **Característica externa:**  $U = f(I)$ , variación de la tensión en función de la corriente de carga a  $n = \text{cte}$  e  $I_{exc} = \text{cte.}$
- **Curva de regulación:**  $I_{ex} = f(I)$ , variación de la excitación en función de la corriente de carga a  $n = \text{cte}$  y  $U = \text{cte}$

# Generador excitación independiente

**Característica magnética**  $\Phi = f(\theta)$

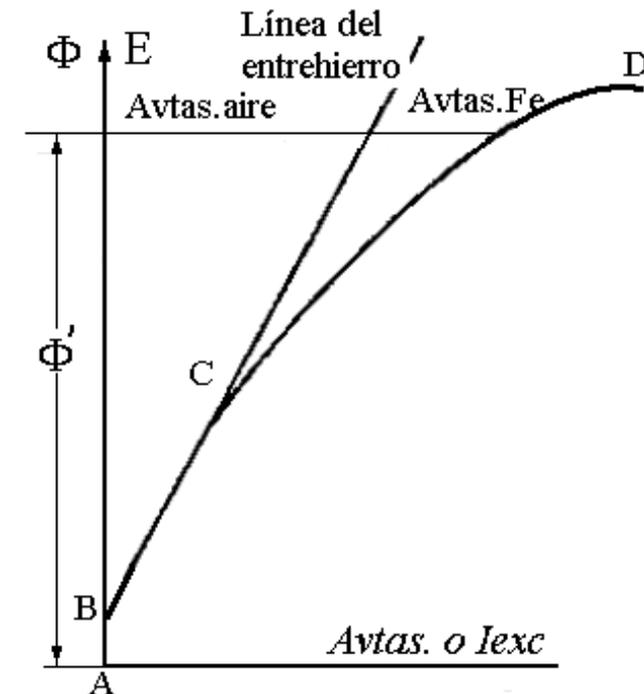
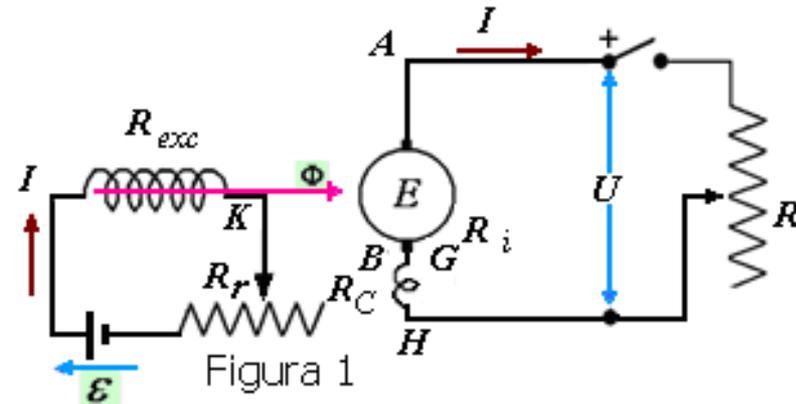
$$\Phi = \Lambda \cdot N I = \Lambda \cdot \theta$$

$$\theta = N I_{ex}$$

Aumentando la excitación, aumenta el flujo, pero la variación no es lineal porque:

1. Hay flujo debido al magnetismo remanente (tramo A-B de la curva), aunque no haya excitación.
2. En valores normales de excitación crece el flujo aproximadamente en forma lineal. (Tramo B-C).
3. Para grandes excitaciones, el circuito magnético se satura y no se obtiene mayor ganancia de flujo (Tramo C-D).

**Exagerar la excitación no nos resulta en más flujo, y nos aumenta las pérdidas  $R_{ex} \cdot I_{ex}^2$**



# Generador excitación independiente

$$E = f(I_{ex})$$

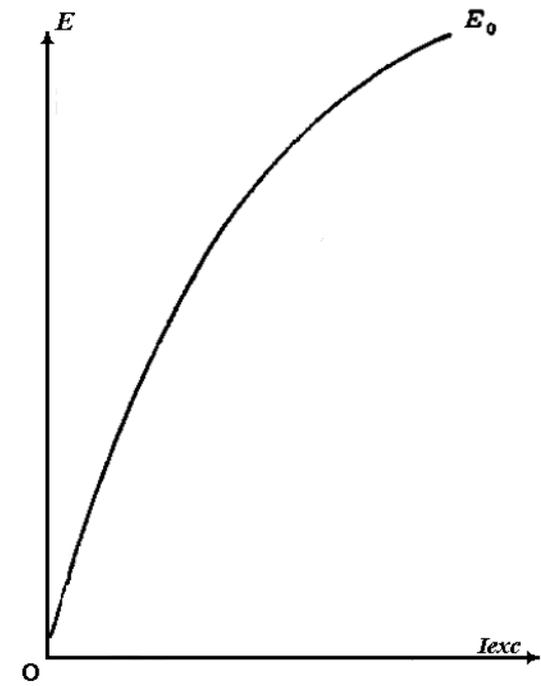
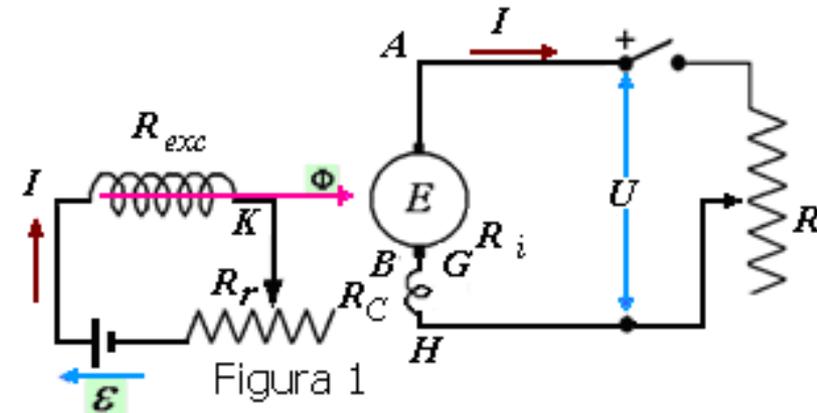
## Característica en vacío

$$I_{ex} \Rightarrow \theta = N I_{ex} \Rightarrow \Phi = \Lambda \cdot \theta$$

$$\Phi = \Lambda \cdot \theta \Rightarrow E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n$$

La curva es semejante a la característica magnética, pero a escala diferente.

- La máquina genera cierta  $E$  aún sin excitación debido al magnetismo remanente.
- Aumentando  $I_{ex}$ , aumenta  $E$ , hasta cierto límite, que es cuando se satura.



# Generador excitación independiente

## Característica en carga

$$U = f(I_{ex})$$

Elementos que ligan E con U:

- **reacción de inducido:** un punto cualquiera va desde B hasta *l*.
- **caídas de tensión interna:** el punto se desplaza de *l* hasta m.

$$BA = \Delta U = (R_i + R_c) I_i + 2\Delta U$$

No parte del origen dado que la máquina requiere, antes de entregar tensión a sus bornes, cierta excitación primero para vencer la reacción de inducido.

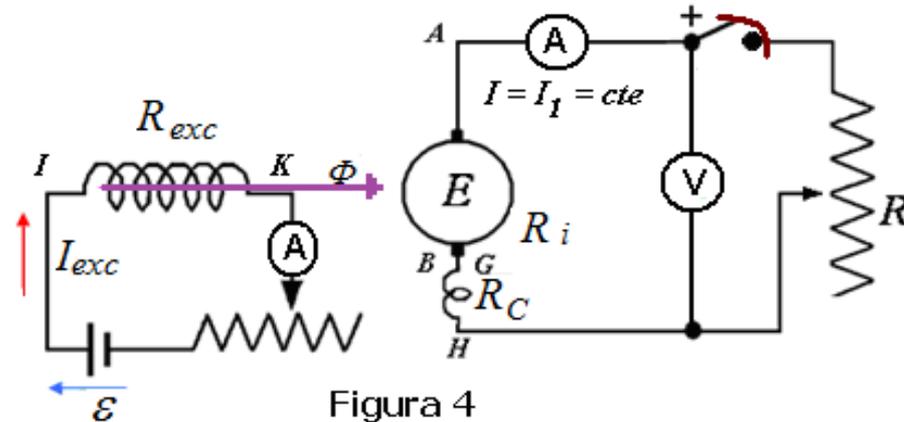
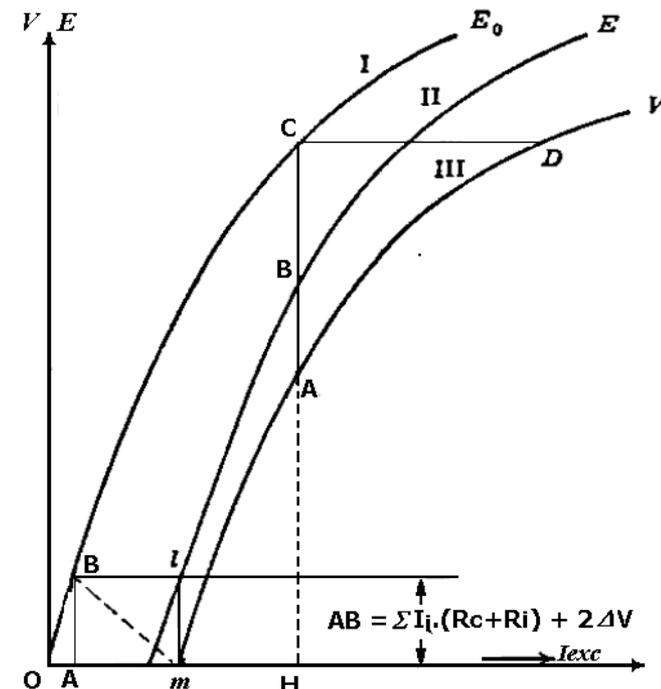


Figura 4



# Generador excitación independiente

## Característica externa

$$U = f(I)$$

➤ **Máquina ideal:** la tensión de bornes no debería variar con la carga (línea punteada).

➤ **Máquina real:** la reacción de inducido y las caídas de tensión aumentan con la corriente, entonces:

- Al aumentar la corriente  $I$  cae la tensión  $U$ .
- En el límite, el cortocircuito, la corriente  $I_{cc}$  es máxima (destrucciona) y la tensión es cero.
- Rango de trabajo normal: zona  $\approx$  recta hasta  $I_n$ .

Este tipo de conexión tiene una tensión muy constante con la carga.

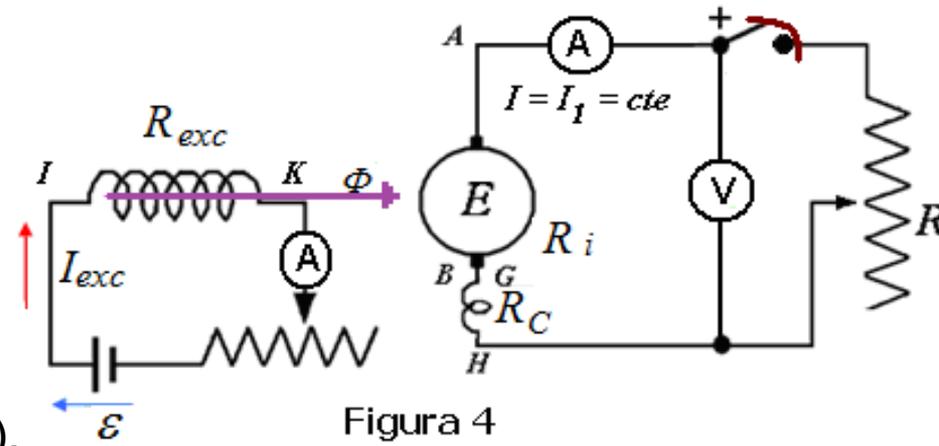
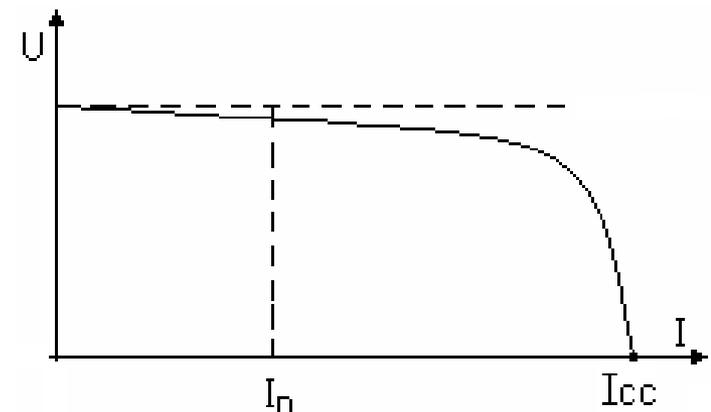
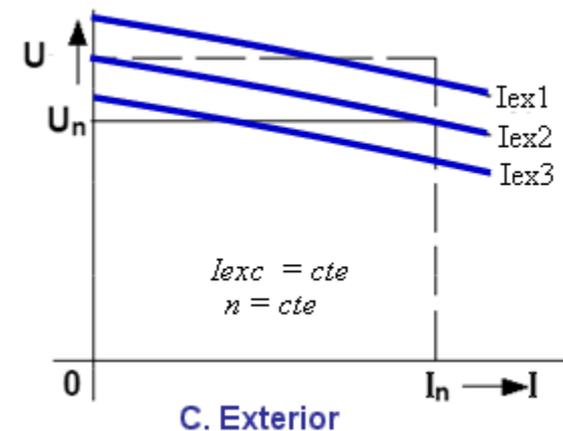


Figura 4

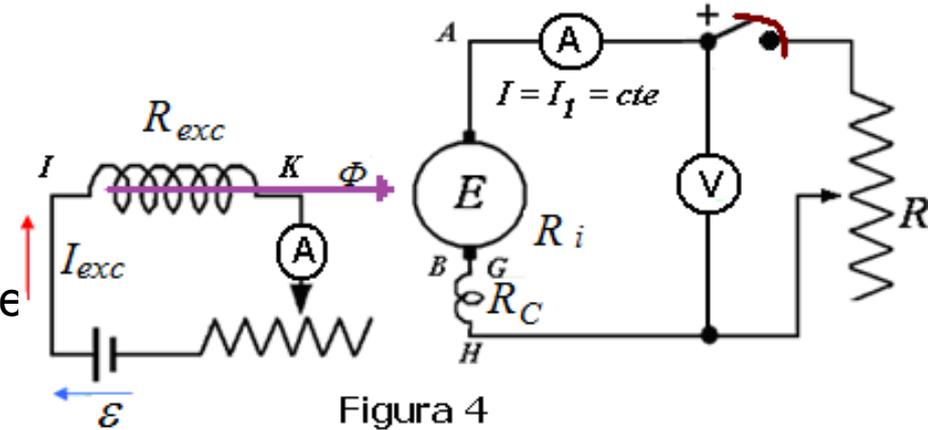


# Generador excitación independiente

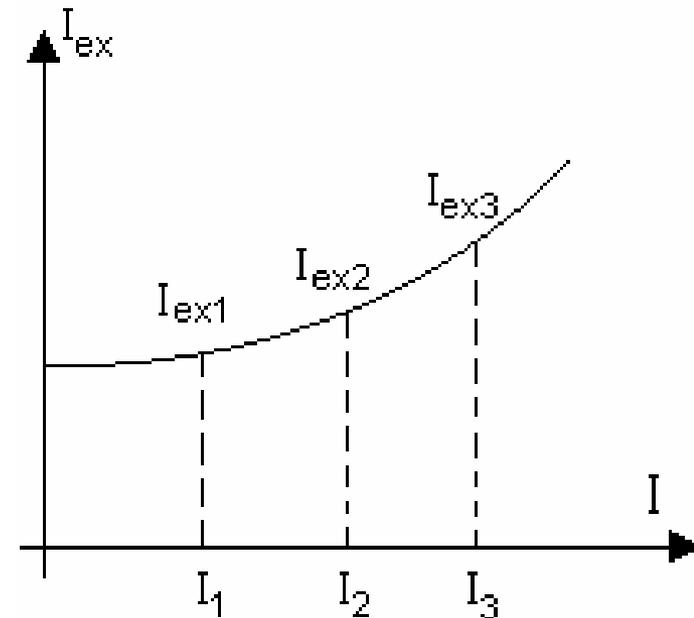
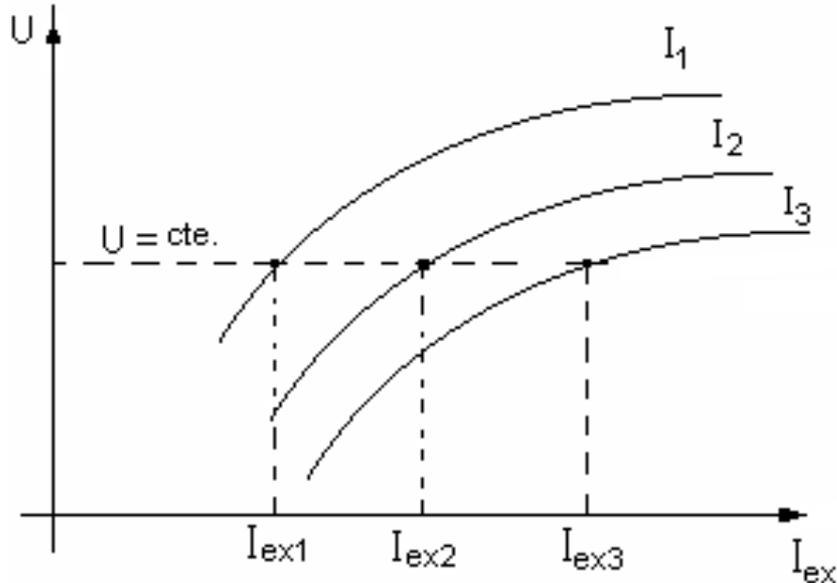
## Curva de regulación

$$I_{ex} = f(I)$$

Para tener tensión constante a medida que aumenta la carga, se debe aumentar la excitación.



Necesidad de tener un dispositivo automático que regule la excitación.



# Generador derivación

**Característica en vacío**  $E = f(I_d)$

- RECTA DE TENSIÓN:

$$U = (R_d + R_r) I_d$$

$$\text{tg } \alpha = U / I_d = R_d + R_r$$

- La corriente de excitación  $I_d$  aumentará cuando:

fem. del inducido  $>$  tensión del circuito derivación

- En el equilibrio (punto A) éstas se igualan, y se obtiene la tensión de régimen.

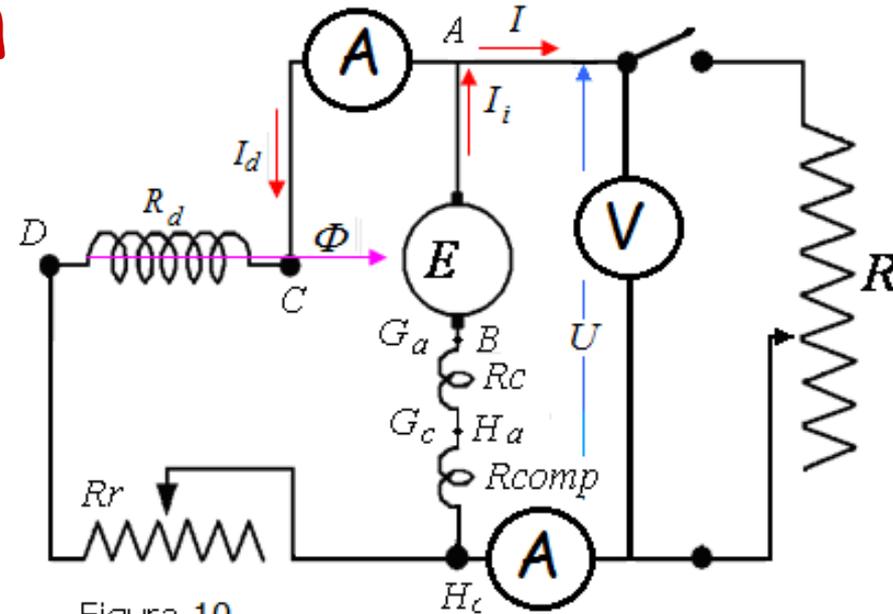
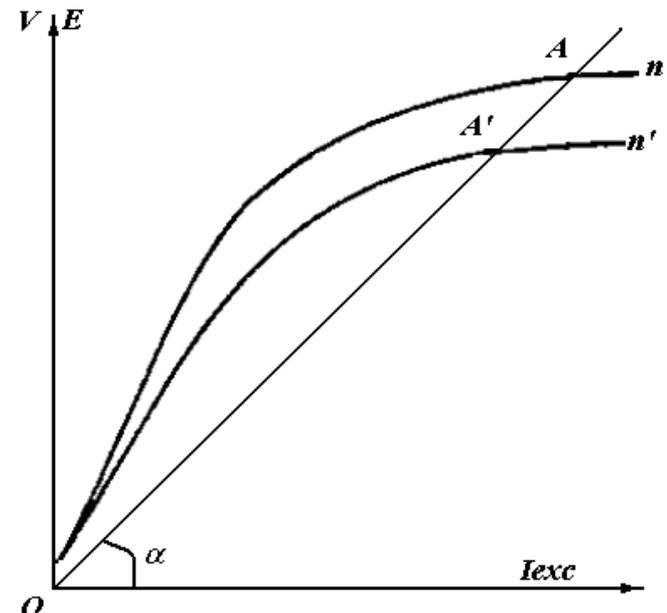


Figura 10



# Generador derivación

## Característica en vacío

### Conclusiones

$$E = f(I_d)$$

1) Pequeñas  $\Delta R_r$  provocan grandes  $\Delta U$  no lineales (desplazamiento del punto de interacción A)

2) Para cierto valor de  $R_r$  coinciden la recta con la parte rectilínea de la característica en vacío, hay indeterminación  $\Rightarrow$  no se pueden regular bajas tensiones.

3) Al bajar la velocidad, manteniendo la recta de tensión constante llega un momento en que ésta no corta a la curva, no hay punto de equilibrio, no habrá tensión.

Las máquinas derivación sin  $R_r$  no generan a bajas velocidades.

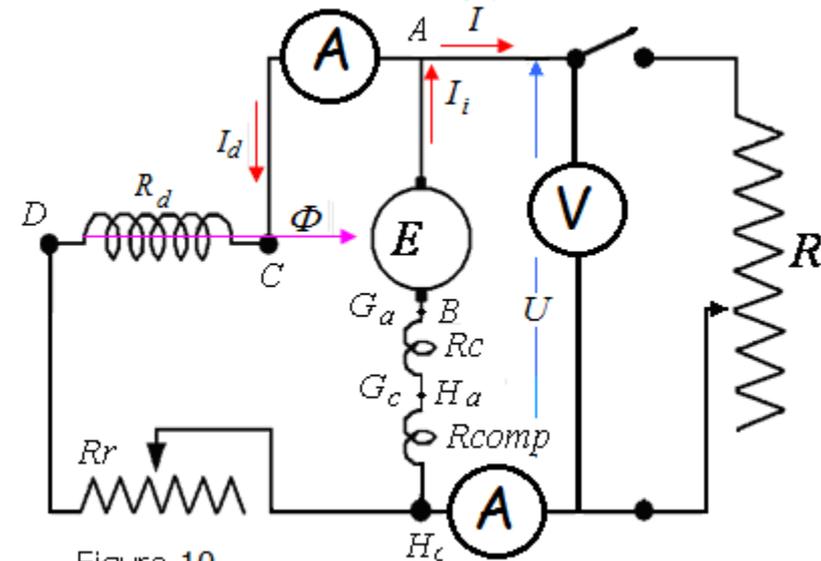
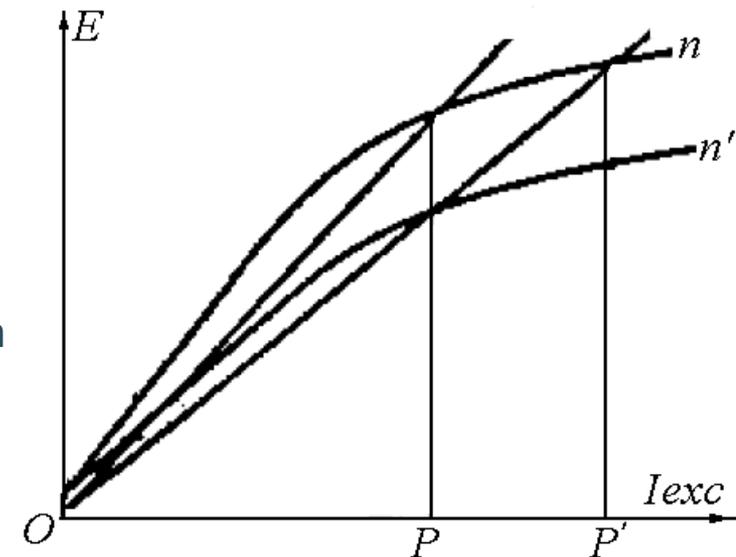


Figura 10



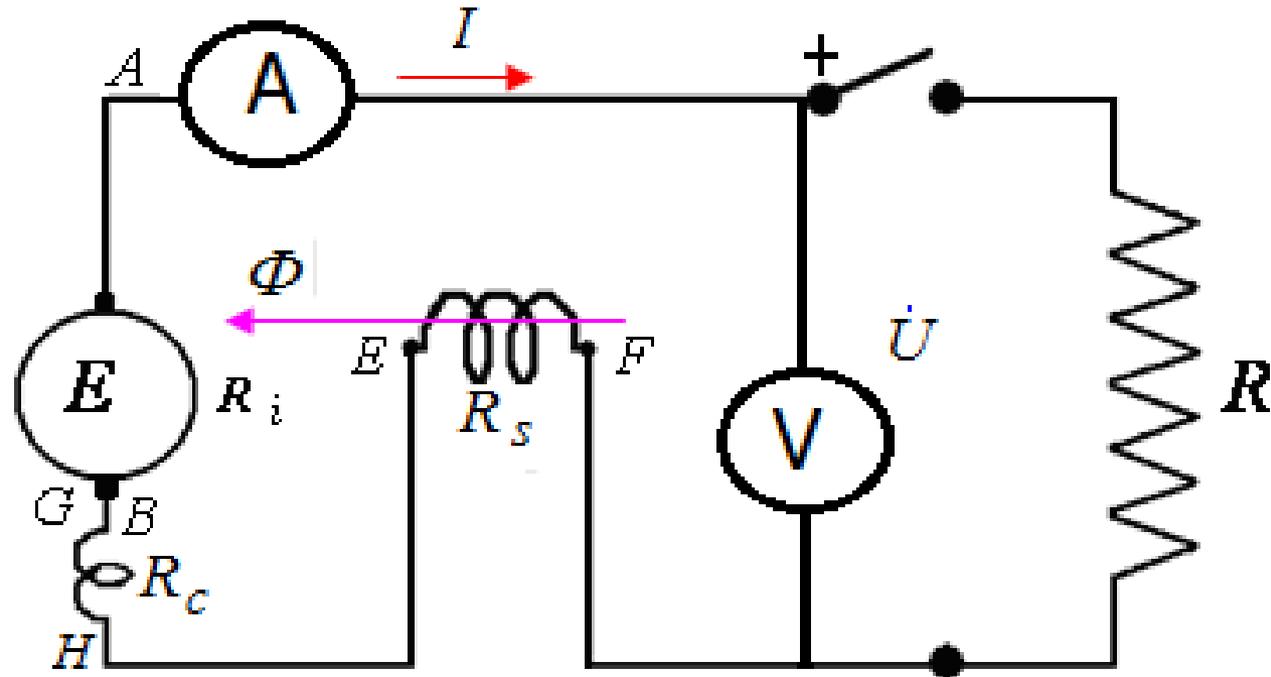




# Generador serie

## Características magnéticas y en vacío

$$I = I_i = I_{ex}$$



La corriente de carga es igual a la de excitación y solo podrá funcionar teniendo conectada una carga (para que cierre el circuito).

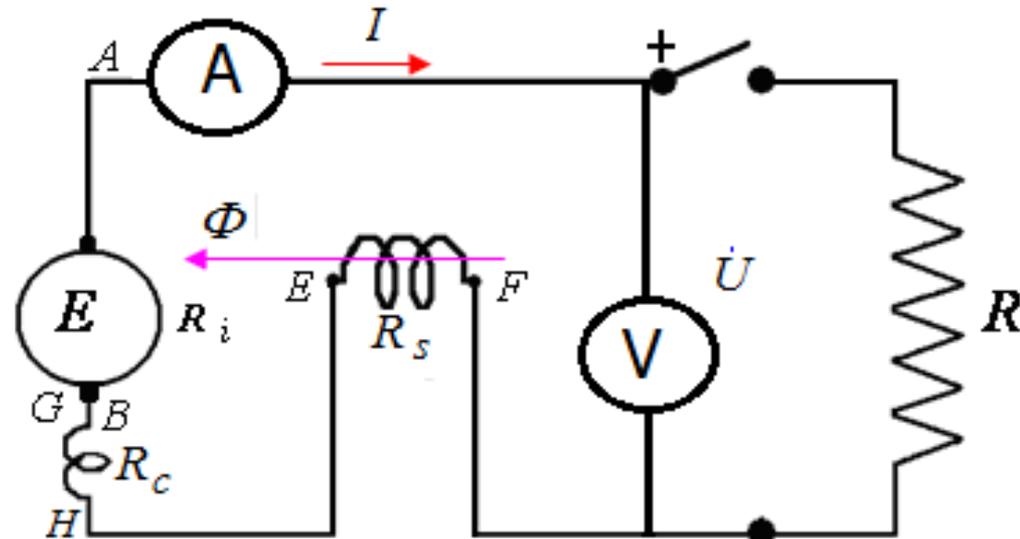
Por ello no se pueden trazar las características magnéticas y en vacío.

# Generador serie

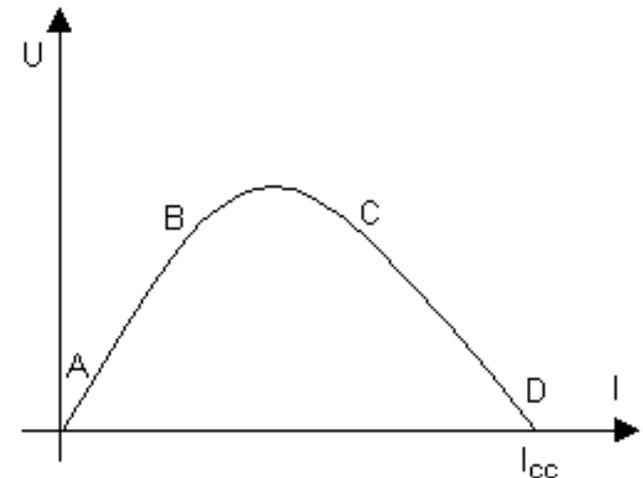
## Característica en carga o externa

- **tramo A-B:** Al aumentar la carga, aumenta la excitación y por lo tanto, la tensión.
- **tramo C-D:** Grandes cargas. La reacción de inducido y las caídas de tensión crecen considerablemente, reduciendo la tensión de bornes.
- **cortocircuito :** carga máxima, la tensión es cero y la corriente máxima  $I_{cc}$ .

No sirve como generador.



$$U = f(I_s) = f(I)$$

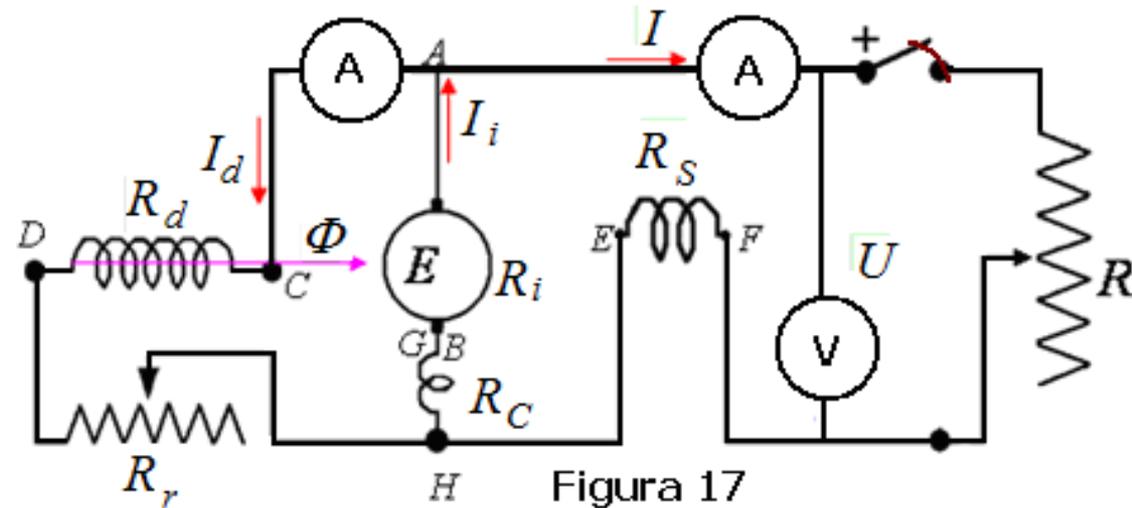


# Generador compuesto

## Característica magnética y en vacío

Dos arrollamientos en los polos ppales, el derivación  $R_d$  y el serie  $R_s$ .

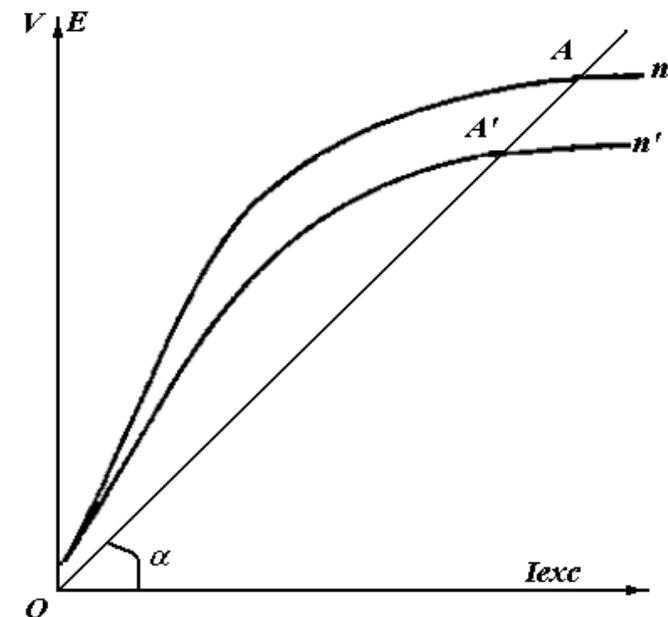
Tres máquinas distintas, según predominancia de un arrollamiento respecto al otro:



- $\theta_d > \theta_s$  devanados en igual sentido: compuesta normal
- $\theta_d < \theta_s$  devanados en igual sentido: sobre compuesta
- $\theta_d > \theta_s$  devanados en sentido contrario: compuesta diferencial

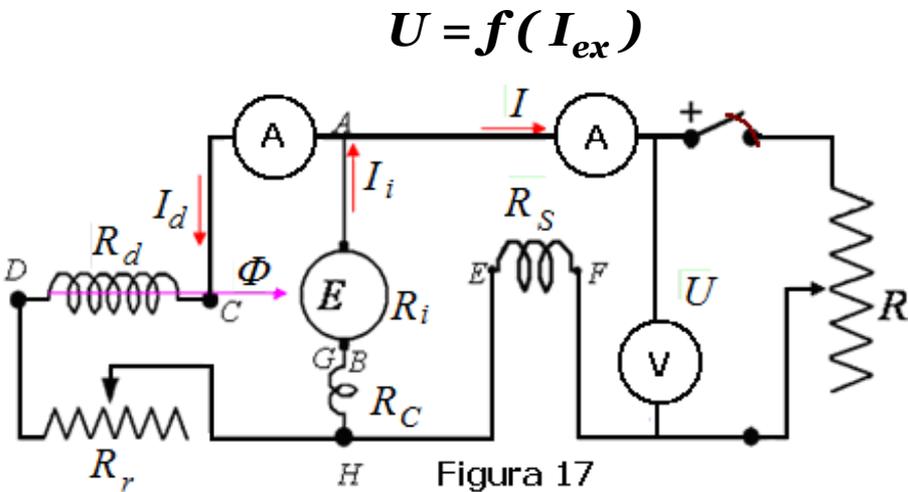
Característica:

- No trabaja el arrollamiento serie en estas condiciones.
- Para los 3 casos, es igual a la de excitación derivación.

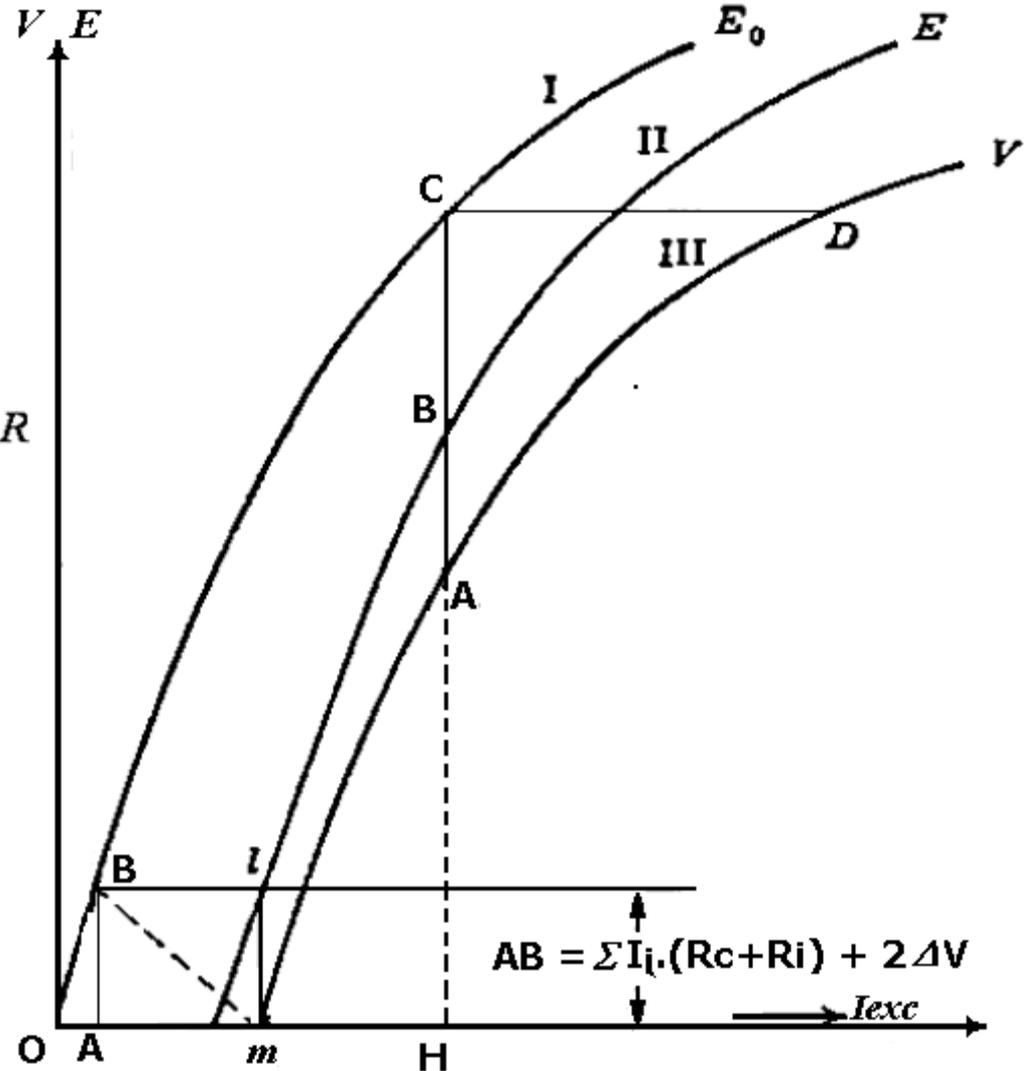


# Generador compuesto

## Característica en carga



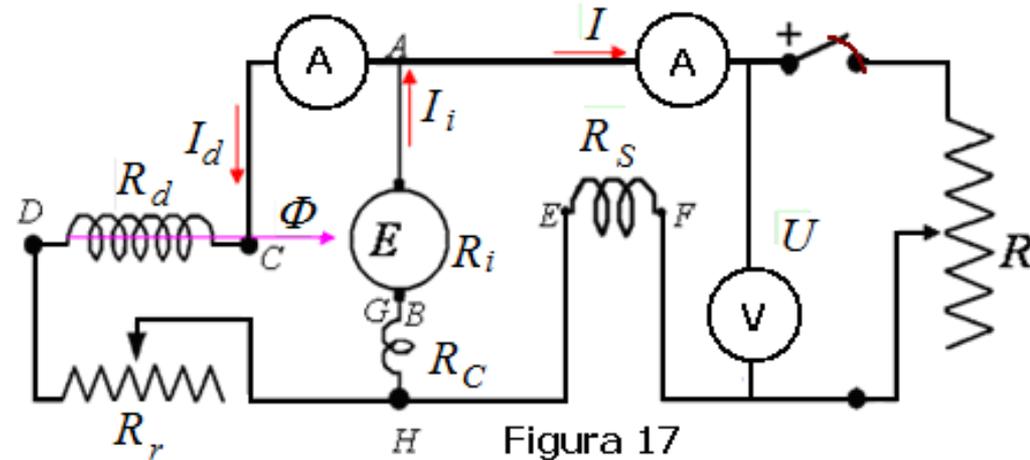
**Compuesta normal y sobre compuesta:**  
 la influencia del arrollamiento serie hace que la reacción del inducido sea menor.



# Generador compuesto

## Características externas

$$U = f(I)$$



$\theta_d > \theta_s$  devanados en igual sentido: compuesta normal

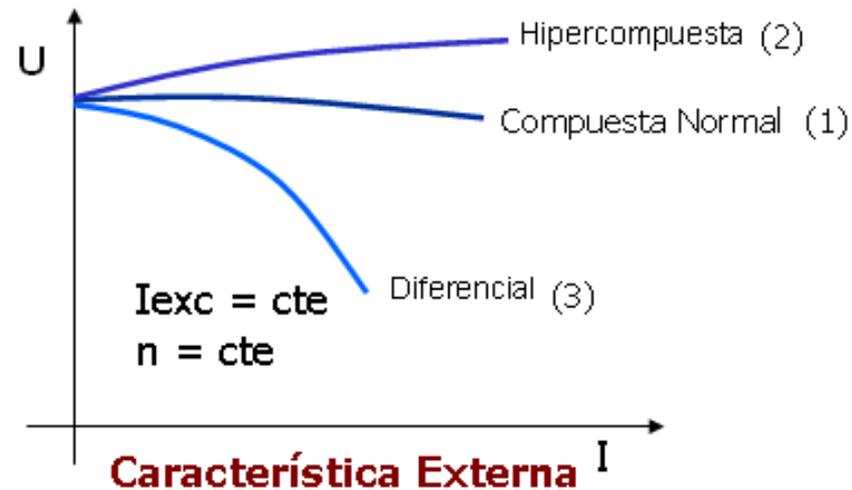
$\theta_d < \theta_s$  devanados en igual sentido: sobre compuesta

$\theta_d > \theta_s$  devanados en sentido contrario: compuesta diferencial

**Compuesta normal (curva 1):** Máquina para carga de baterías, y generadores en general.

**Sobre compuesta (curva 2):** Mientras más carga posee, más tensión entrega.

**Compuesta diferencial (curva 3):** Máquinas para soldadura eléctrica en corriente continua.



# Motor de C.C.

# Parámetros a variar

- El **Par Motor**: ¿de qué parámetros depende?; ¿cómo se lo puede variar?; ¿podemos considerar otros pares en el motor de continua?; ¿tiene que ver el tipo de excitación?
- La **velocidad**: ¿de qué parámetros depende?; ¿cómo se la puede variar?; ¿guarda alguna relación con el par motor?; ¿es lo mismo con cualquier excitación?
- El **arranque**: ¿tiene inconvenientes?; ¿es lo mismo con cualquier excitación?
- El **frenado**: ¿existen distintos tipos?; ¿como frenar los motores de distinta excitación?
- **Inversión de marcha**: ¿cómo hacerlo?; ¿da lo mismo para cualquier tipo de excitación?

# Análisis de esos Parámetros

## Ecuación de la velocidad

$$E = \frac{\phi \cdot n \cdot N \cdot p}{60 \cdot a} \quad \rightarrow \quad U = E + RI$$

$$I = \frac{U - E}{R} \quad \rightarrow \quad n = \frac{60 \cdot a}{\phi \cdot N \cdot p} \cdot (U - R \cdot I)$$

- Para variar la velocidad, se puede actuar sobre la tensión  $U$ , flujo  $\Phi$ , o caídas internas  $R \cdot I$
- Con mayor o menor excitación (flujo  $\Phi$ ) se obtiene menor o mayor velocidad.
- Si un motor se queda sin excitación, la velocidad tiende a infinito, la máquina se "embala".

Ej.: Subte. Bs.As. 4 Motores tetrapolares de 93 kW- 750 V-139 A - 1410 rpm

# Análisis de esos Parámetros

## Corriente de arranque

$$I = \frac{U - E}{R} \quad (\text{corriente absorbida, máquina en marcha})$$

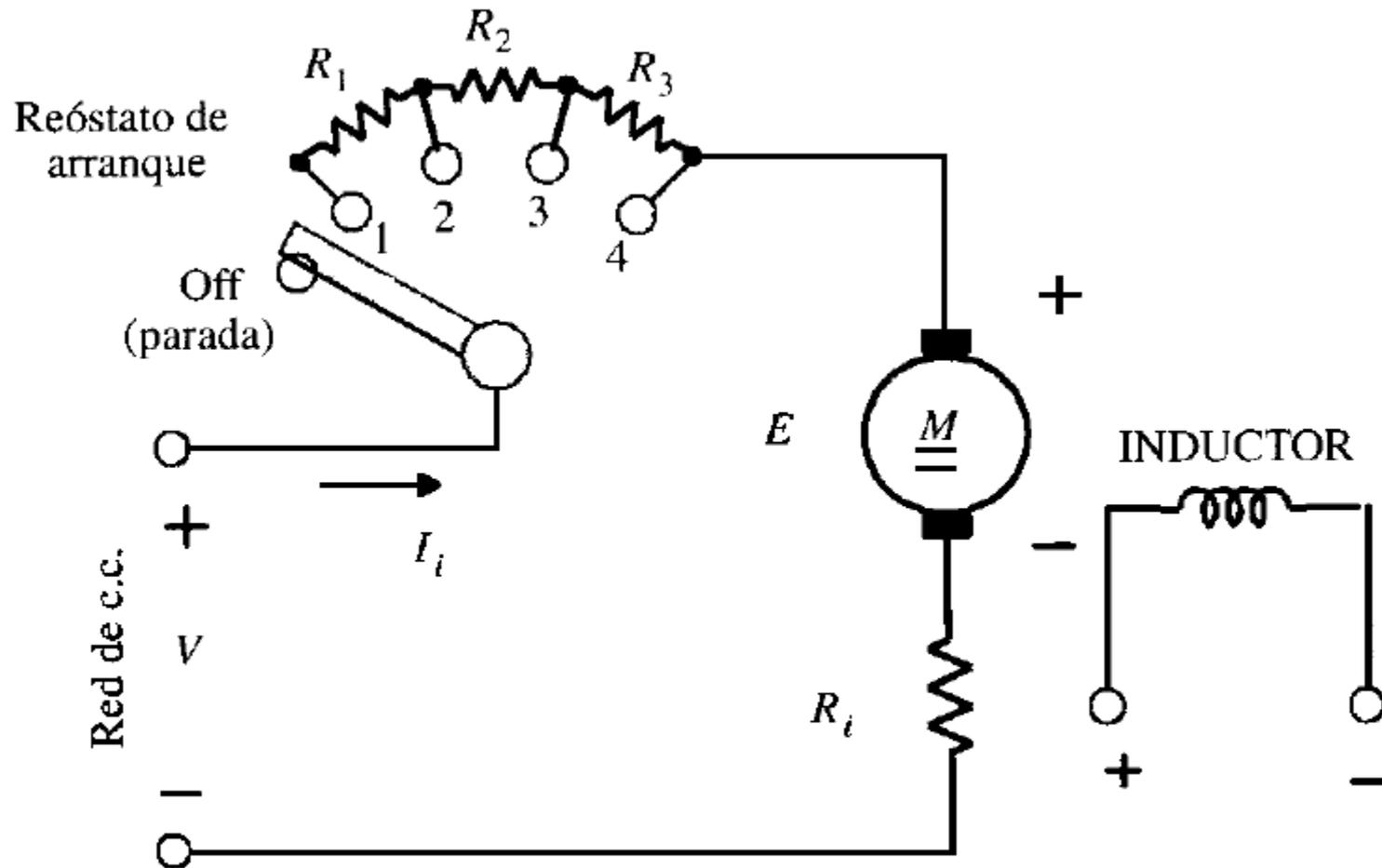
$$n = 0 \rightarrow E = 0$$

$$I_{Arr} = \frac{U}{R} \quad (\text{corriente absorbida grande, momento del arranque})$$

- Reducción por resistencias de arranque  $R_A$ :

$$I_{Arr} = \frac{U}{R + R_A}$$

- Resistencias de Arranque



Reóstato de arranque y su conexión.

Hoy día con contactores y relees de tiempo para la conmutación de las resistencias.

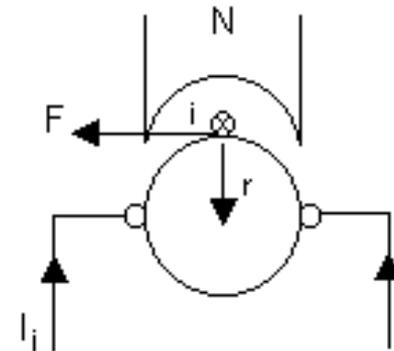
# Análisis de esos Parámetros

## Ecuación del Momento resistente y de rotación

En forma general:  $\tau = F.r$  ;  $F = i.l.B$

Fuerza en los N conductores del inducido:

$$F = N.l.i.B$$



Considerando:

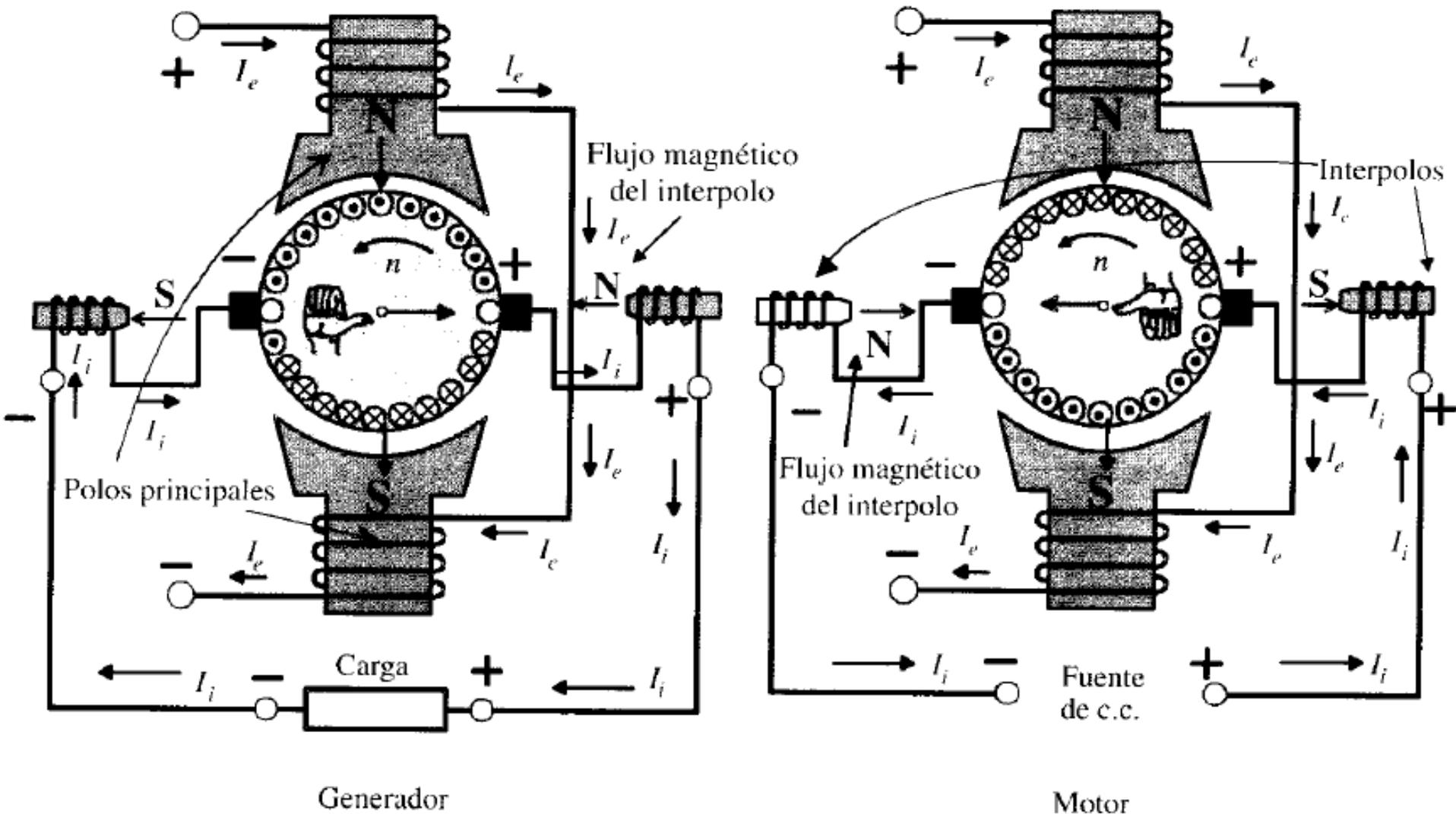
$$B = \frac{\phi}{S} \quad S = t_p.l \quad t_p = \frac{\pi.D}{2.p} \quad D = 2.r \quad i = \frac{I_i}{2.a}$$

surge:

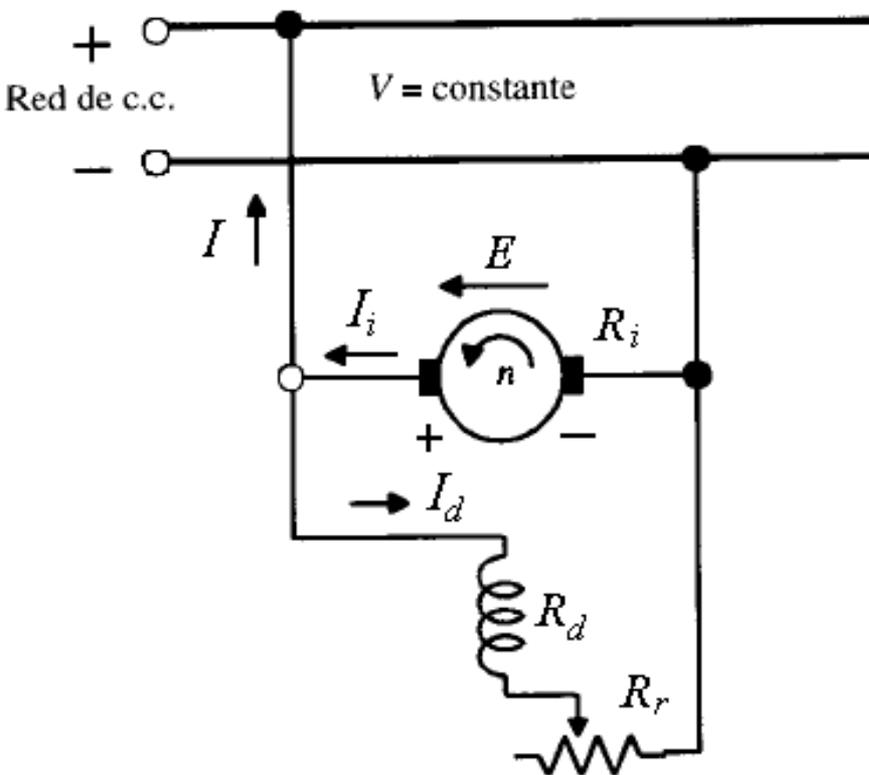
$$\tau = \frac{p.N}{2.\pi.a} . \phi . I_i = K_\tau . \phi . I_i$$

$$[\text{N-m}] = [\text{Wb}] [\text{A}]$$

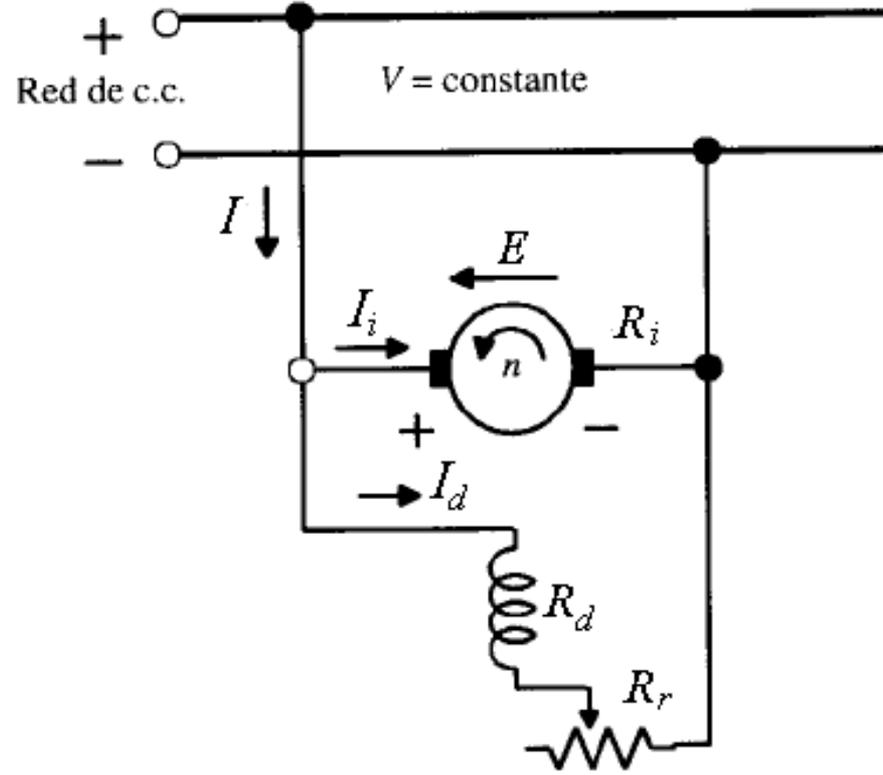
# • Generador y Motor conectados a la red



## • Generador y Motor conectados a la red



a) Generador



b) Motor

Funcionamiento de la máquina de c.c. como generador y como motor

En el Generador la fem es mayor que la tensión en bornes de salida  $E = U + R_i I_i$

Si quitamos el motor de arrastre, se invierte el flujo de energía y la máquina sigue girando como motor, absorbiendo energía de la red. El par antagónico se transformó en par motor y ahora la fem es menor que la Tensión  $U = E + R_i I_i$

## • Balance de Potencias y Ecuación del Par

Para motor la ecuación de equilibrio es:  $U = E + R_i \cdot I_i$

Si multiplicamos m. a m. por  $I_i$   $U \cdot I_i = E \cdot I_i + R_i \cdot I_i^2$

Pero  $U \cdot I_i$  es la Potencia que llega al Inducido

$R_i \cdot I_i^2$  representa las pérdidas de Joule en los bobinados

$E \cdot I_i$  es la potencia electromagnética transferida en el entrehierro, por lo tanto igual a la potencia mecánica

$E \cdot I_i = \tau \cdot \omega \Rightarrow \tau = E \cdot I_i / \omega \Rightarrow$  sustituyendo  $E$  y  $\omega$  resulta el par:

$$\tau = \frac{pN}{60a} \cdot \phi \cdot n \cdot \frac{I_i}{\omega} = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n \cdot \frac{I_i}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi \cdot I_i = K_\tau \cdot \phi \cdot I_i$$

## Motor, potencia electromagnética y Par

$$\tau = \frac{pN}{60a} \cdot \phi \cdot n \cdot \frac{I_i}{\omega} = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n \cdot \frac{I_i}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi \cdot I_i = K_\tau \cdot \phi \cdot I_i$$

$$E = K_E \cdot \phi \cdot n = U - R_i \cdot I_i \quad ; \quad n = \frac{U}{K_E \cdot \phi} - \frac{R_i}{K_E \cdot \phi} \cdot I_i$$

del  $\tau \Rightarrow I_i = \frac{\tau}{K_\tau \cdot \phi}$  *sustituyendo resulta:*

$$n = \frac{U}{K_E \cdot \phi} - \frac{R_i}{K_\tau \cdot K_E \cdot \phi^2} \cdot \tau \quad ; \quad n_0 = \frac{U}{K_E \cdot \phi} \quad \text{a par nulo}$$

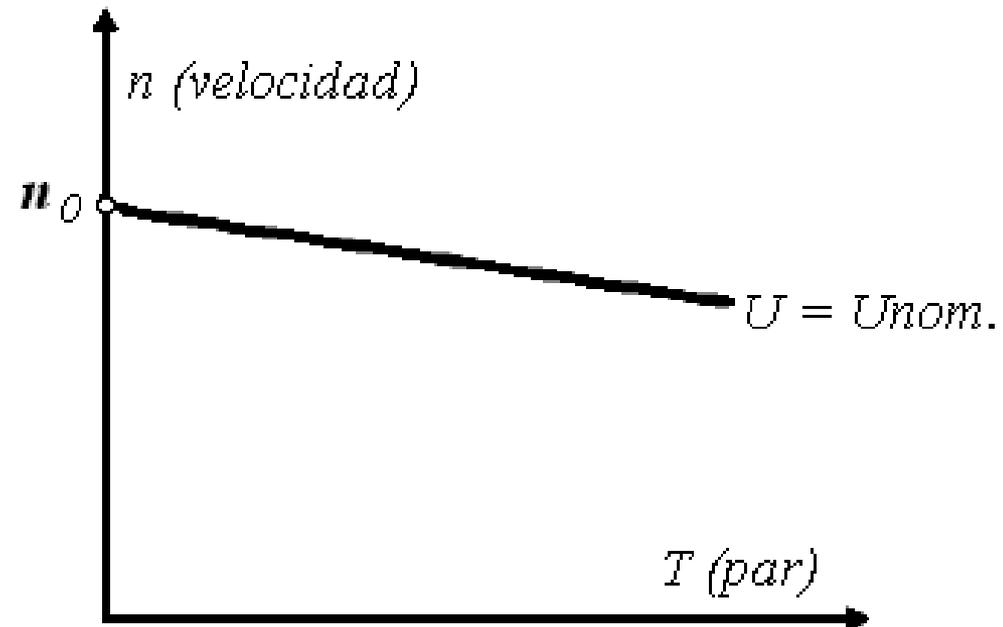
## • Característica de Velocidad

$$n = \frac{U}{K_E \cdot \phi} - \frac{R_i}{K_\tau \cdot K_E \cdot \phi^2} \cdot \tau ; \quad n_0 = \frac{U}{K_E \cdot \phi} \quad \text{a par nulo}$$

Si aumenta el par resistente disminuye  $n$  y también la Fem.

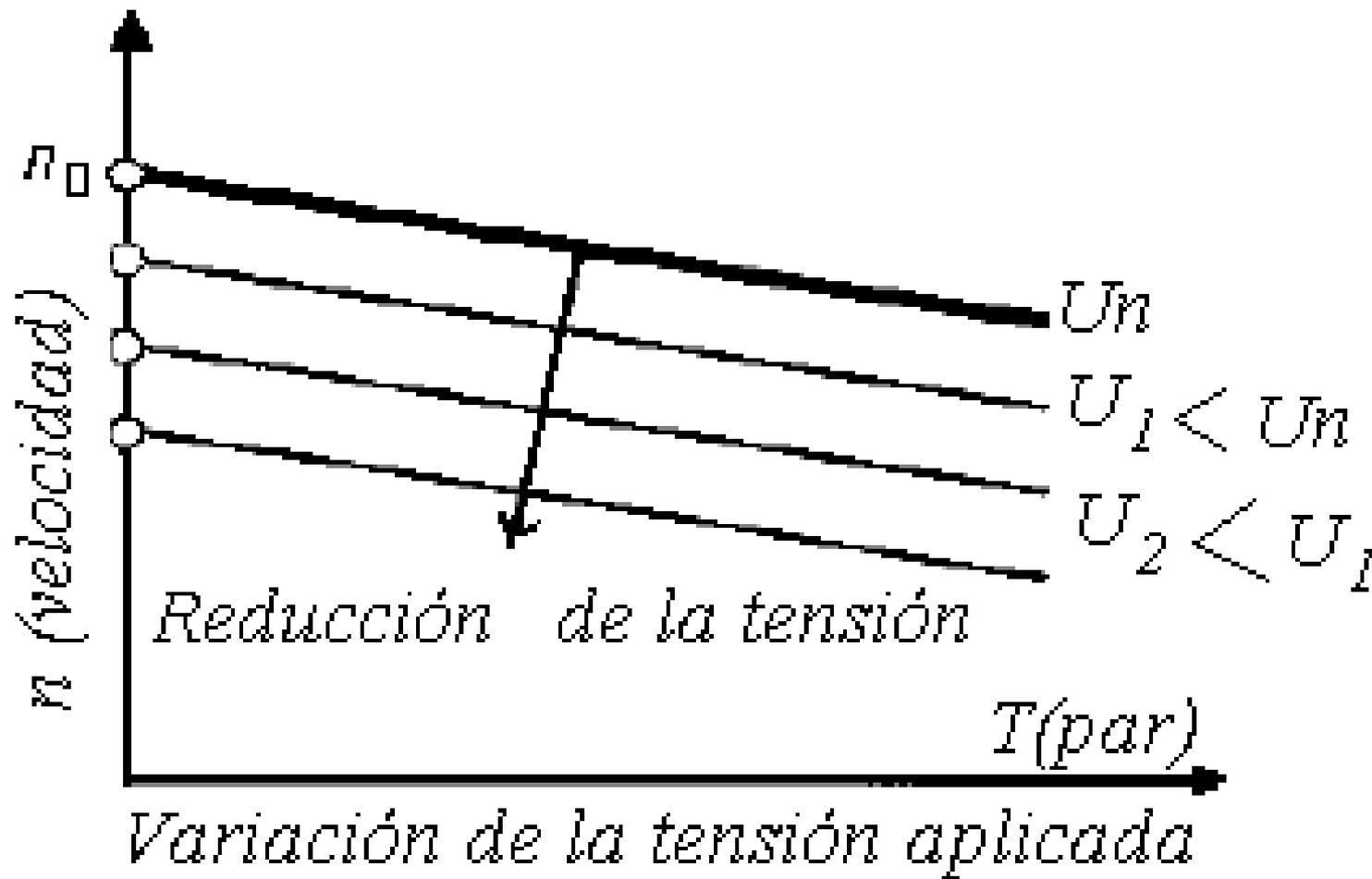
$E = K_E \cdot \Phi \cdot n$  y como

$I_i = (U - K_E \cdot \Phi \cdot n) / R_i$  aumentará la  $I_i$  y el par  $\tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i$



*Característica natural*

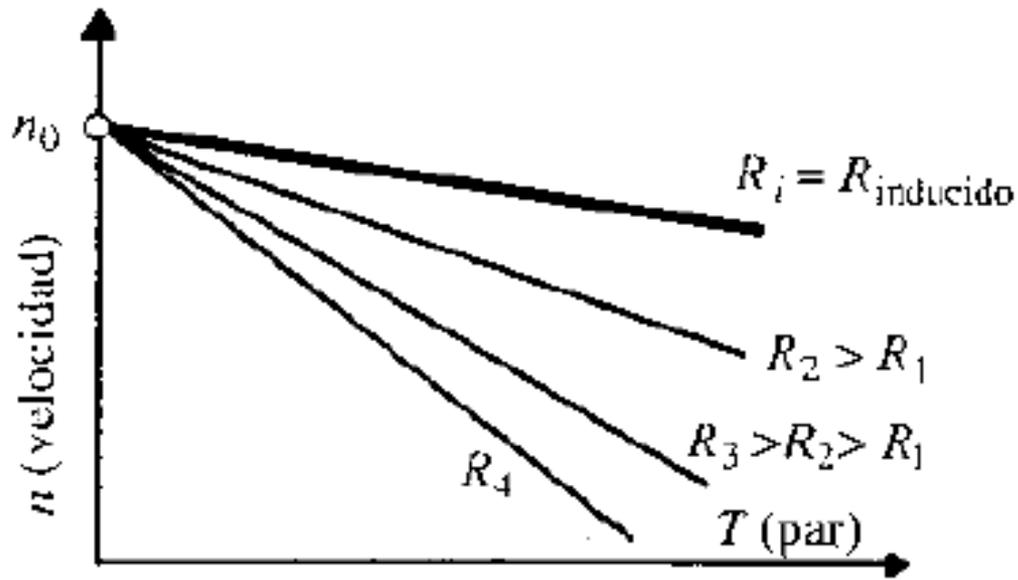
## • Característica de Velocidad



Para altos pares aumenta  $I_r$  y por **reacción de inducido** se reduce el flujo resultante.

De ahí la característica "rígida" o "dura" de los motores derivación.

## • Característica de velocidad

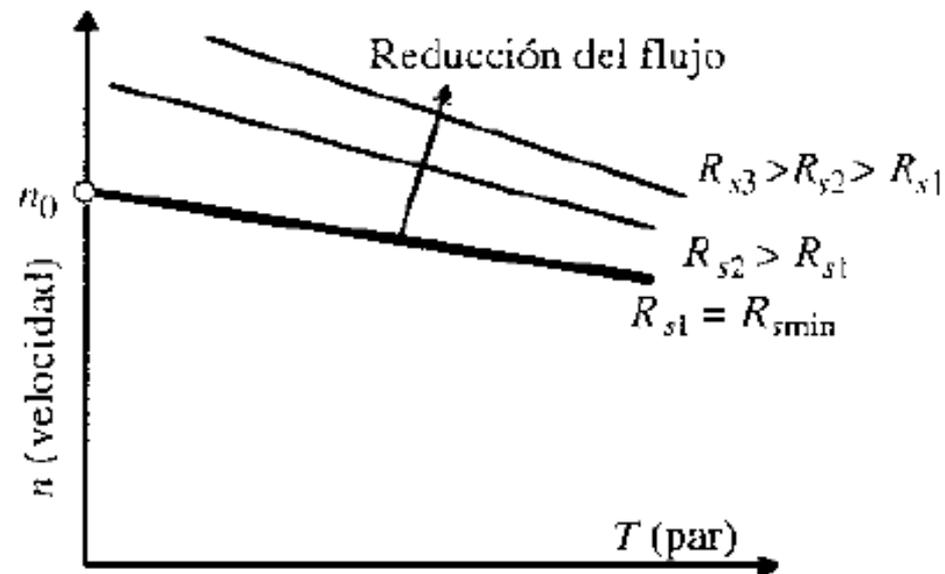


Variación de la resistencia del inducido

Si la  $U = U_n$  entonces la

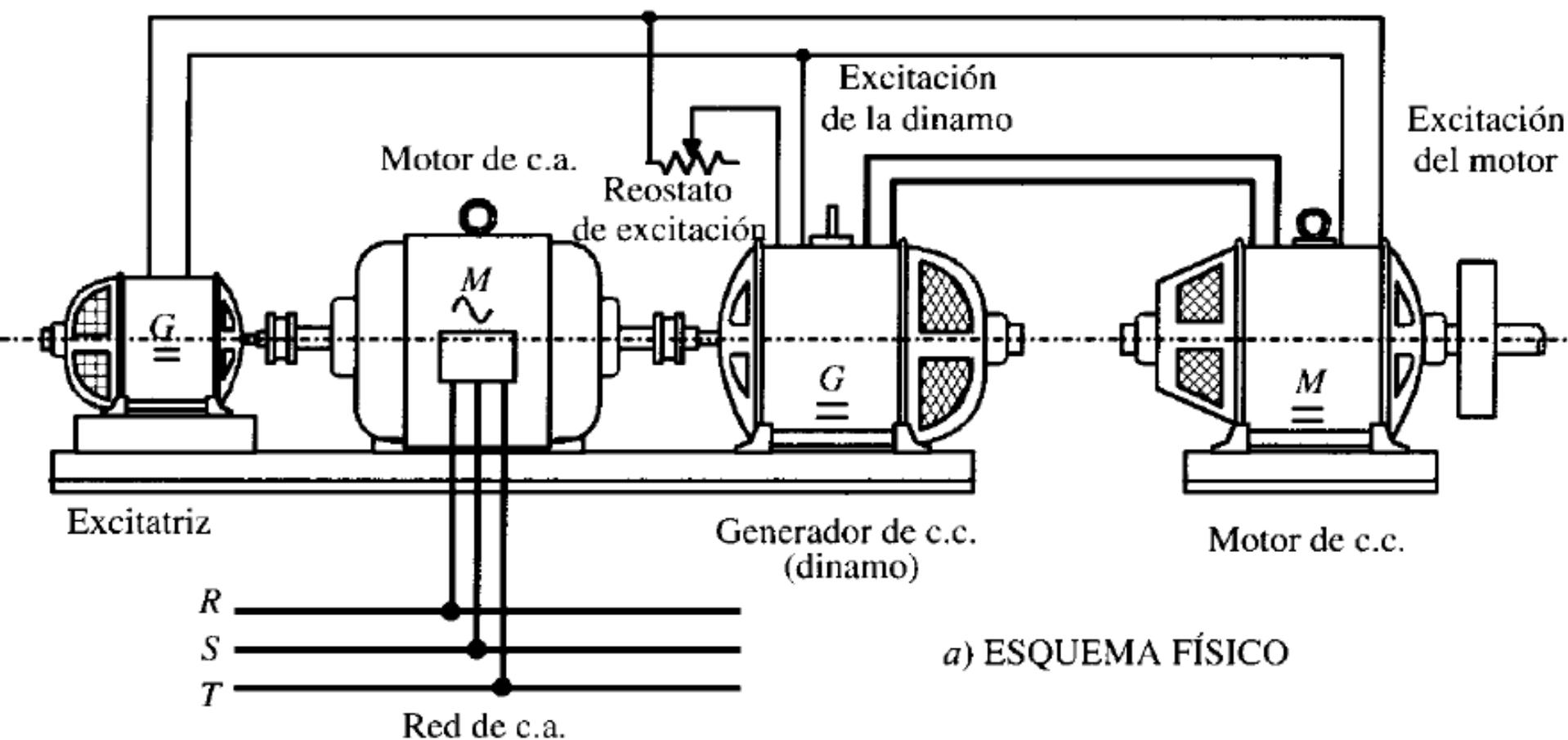
$$I_{\text{ex}} = I_{\text{exn}} \text{ y } P = P_n$$

El motor gira a la velocidad base o nominal  $n_n$



Variación del flujo inductor

- Conexión Ward Leonard:** Motor asincrónico trifásico acoplado a un generador de C.C. de excitación independiente que alimenta el inducido de un motor de c.c. con excitación independiente. La excitatriz que alimenta ambos campos (generador y motor) también va acoplada al eje mecánico del grupo. La polaridad del generador se puede invertir para cambiar el sentido de marcha.

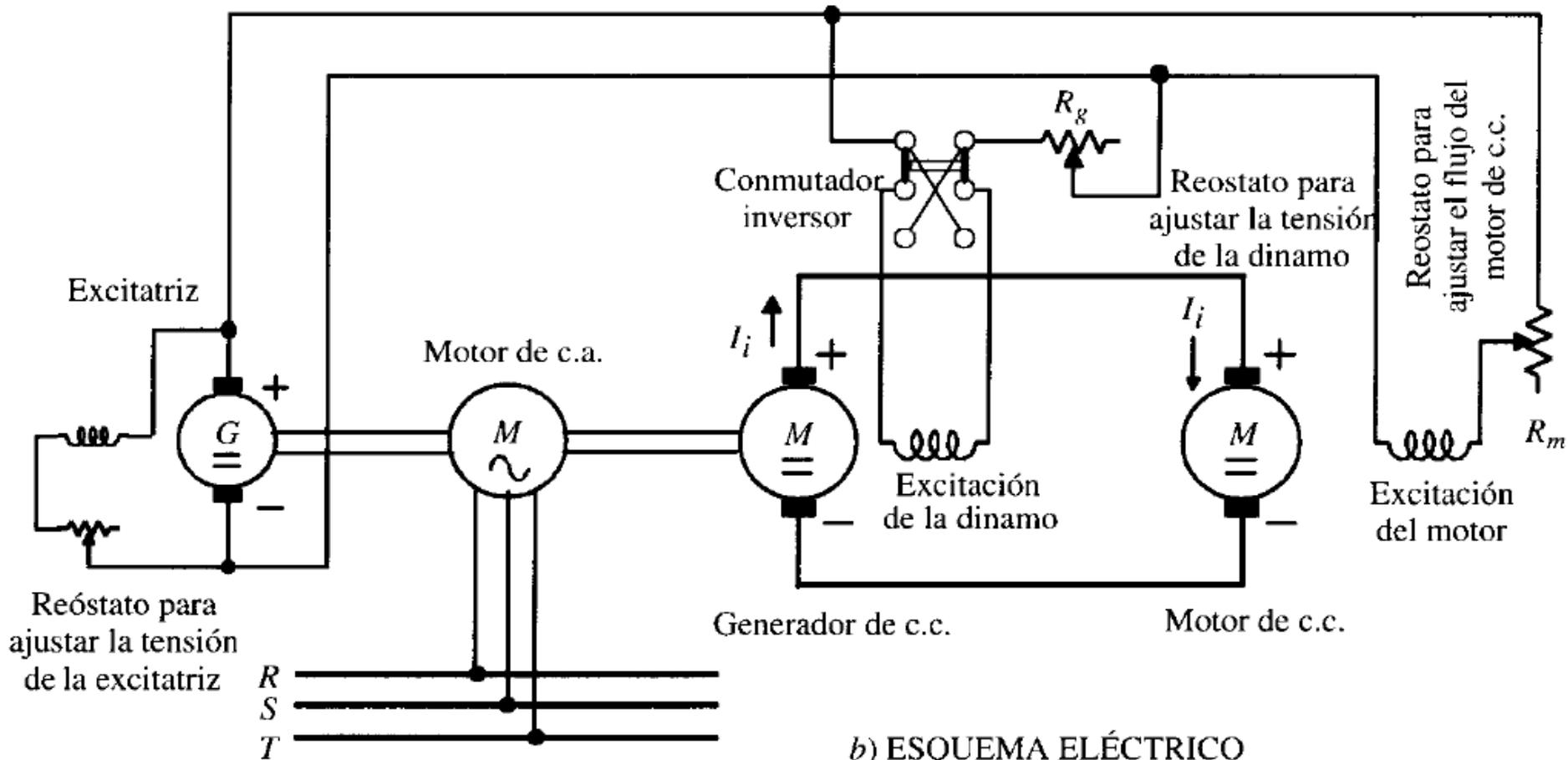


$\tau = k_{\tau} \cdot \Phi \cdot I_i = C_1$ ;  $\tau = C_1 = cte.$  despreciando la caída de tensión en el inducido

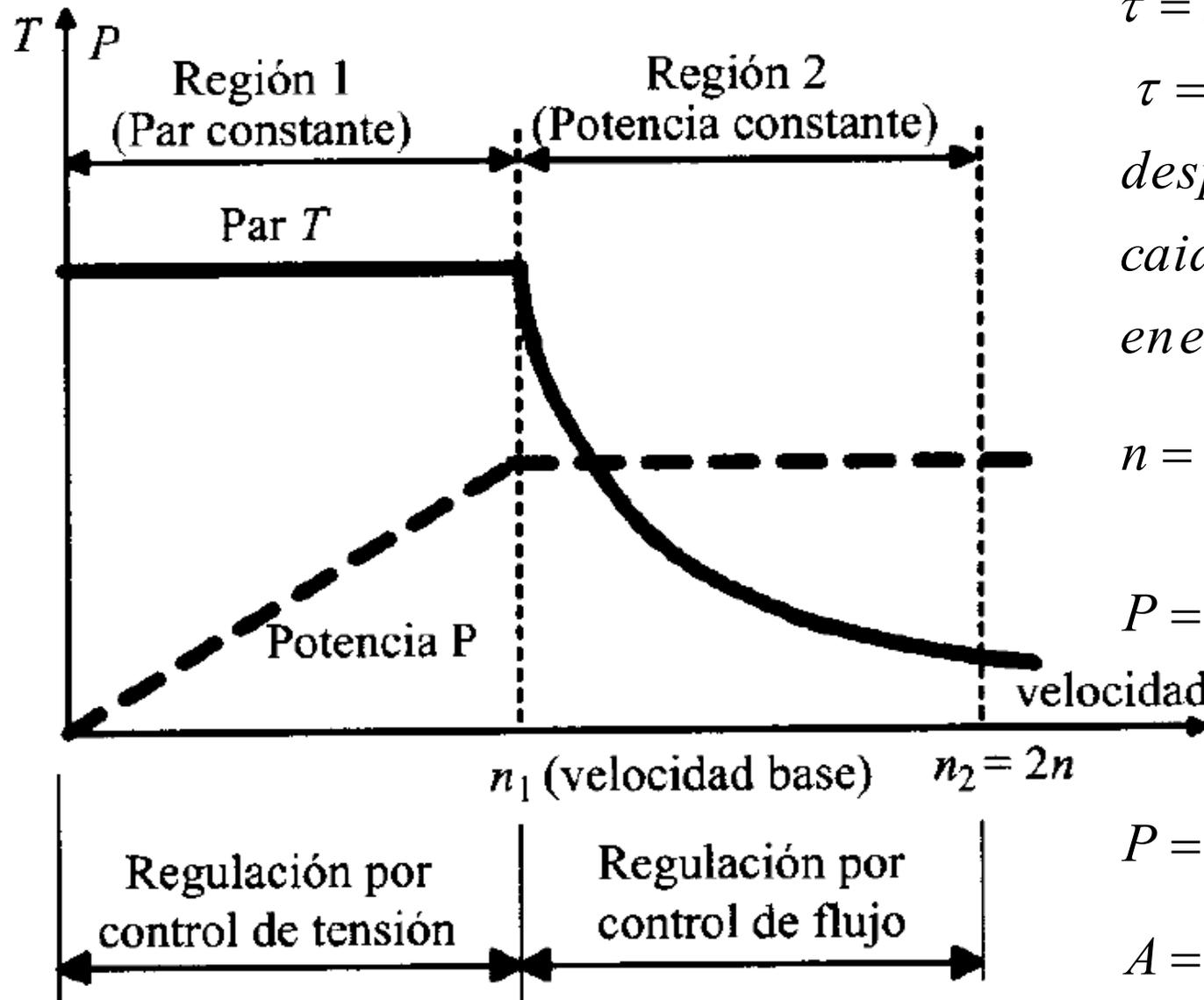
$$n = \frac{U}{K_E \cdot \Phi} = C_2 \cdot U$$

$$P = \tau \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = C_1 \cdot \frac{2 \pi}{60} \cdot C_2 \cdot U = A \cdot U$$

$A = cte$



Sistema de regulación de velocidad Ward-Leonard.



$$\tau = k_{\tau} \cdot \Phi \cdot I_i = C_1 ;$$

$$\tau = C_1 = cte.$$

*despreciando la  
caída de tensión  
en el inducido*

$$n = \frac{U}{K_E \cdot \Phi} = C_2 \cdot U ;$$

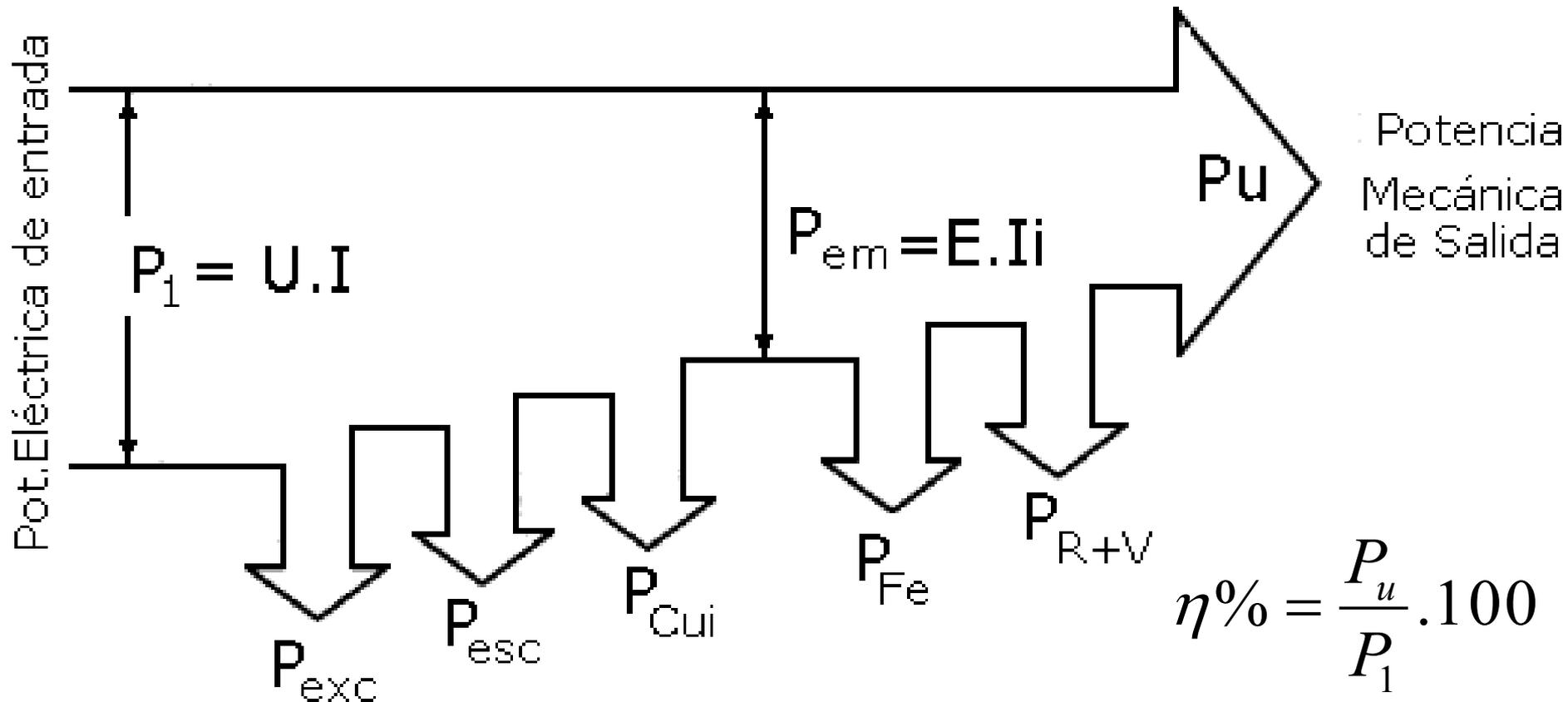
$$P = \tau \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

$$P = C_1 \cdot \frac{2 \pi}{60} \cdot C_2 \cdot U = A \cdot U ;$$

$$A = cte ; \quad P = A \cdot U$$

Regulación de velocidad a potencia constante y a par constante.

# MOTOR: BALANCE DE POTENCIAS



$P_{exc} = R_{exc} \cdot I_{exc}^2$  - Pérdidas en el Cobre de la Excitación ;

$P_{escobillas} = \Delta U \cdot I_i$  - Pérdidas en las escobillas ;  $P_{cui} = R_i \cdot I_i^2$  - Pérdidas en el Cobre del Inducido ;  $P_{fe}$  = Pérdidas en el Hierro ;  $P_{R+V}$  = Pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación

# Motor de excitación independiente

## Arranque

- Toda la  $R_A$  está incluida (punto A).
- Una vez en marcha, se elimina (punto M) para tener pleno par ( $I_i$ ) y no tener pérdidas inútiles ( $R_A I_i^2$ ).

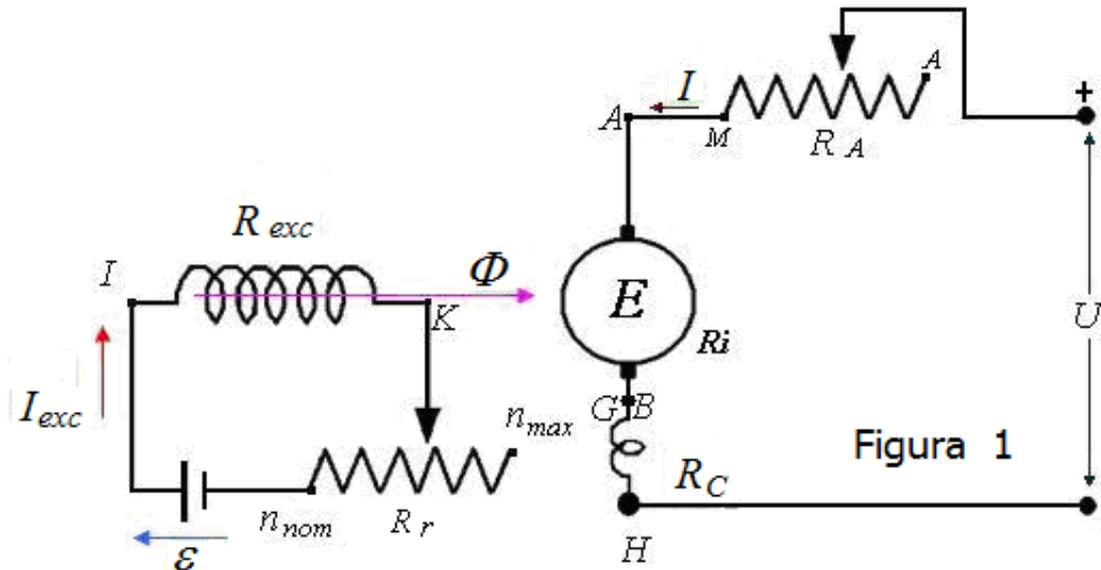
## Velocidad

Se regula:

- Variando la tensión  $U$  (motores pequeños).
- Variando  $R_r$ , varía la excitación, equivale a variar  $\Phi$
- Con el agregado de  $R_i$
- Desde valores nominales en adelante.

## Momento

- En el arranque conviene tener mucho par, o sea gran excitación, punto A de  $R_r$ .
- Este motor arranca con gran par a baja velocidad.



# Motor de excitación independiente

## Inversión de marcha

Por cambio de polaridad en los bornes.

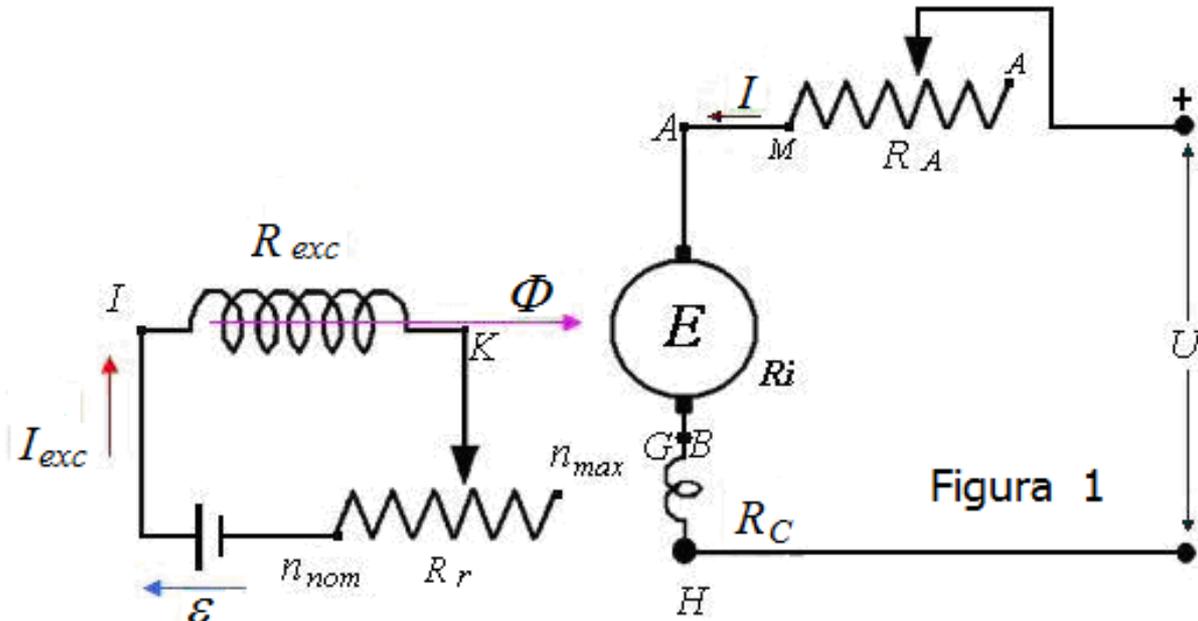
## Frenado

1. Por disipación de energía.
2. Por contracorriente (inversión de marcha), la detención es muy brusca.

## Curvas características

$n = f(\tau)$ ,  $I_{exc} = cte.$ ; la velocidad es independiente del par. Las caídas  $RI$  son pequeñas. Es un motor de velocidad muy constante.

$I = f(\tau)$ ; la  $I$  crece proporcionalmente a  $\tau$ , no es rectilínea por reacción de inducido.



# Motor derivación

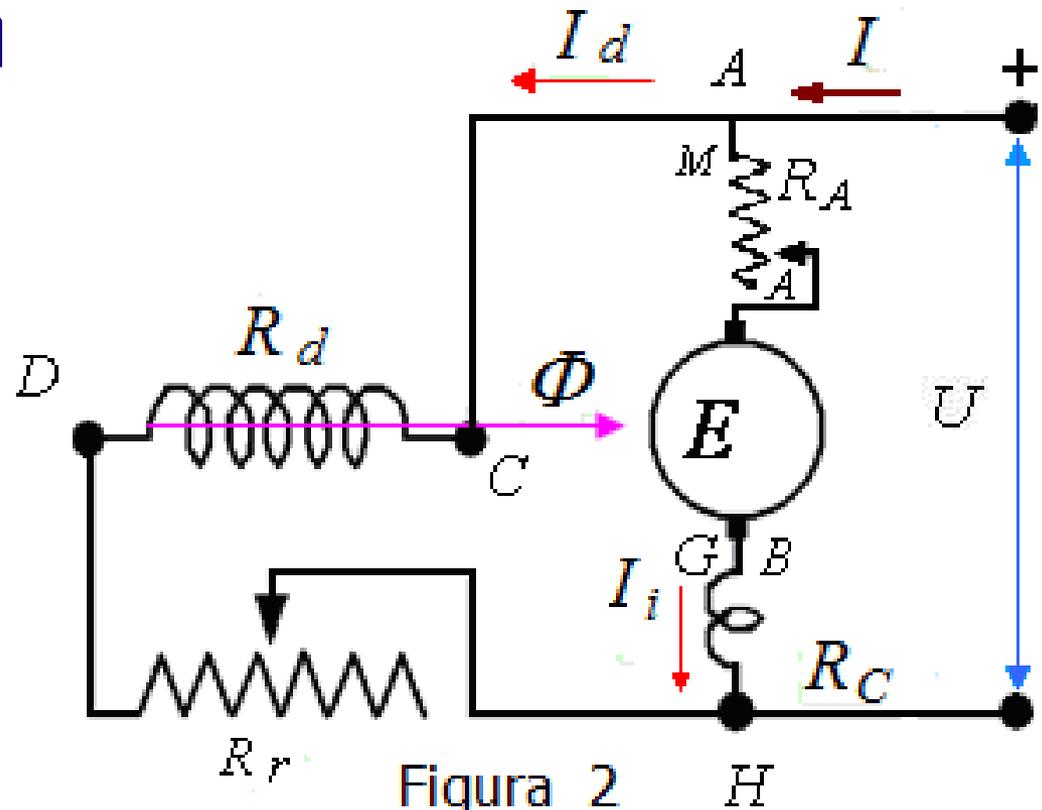
## Arranque

- La  $R_A$  debe colocarse en la rama del inducido.
- No igual al motor de excitación independiente, porque de ser así reduciría el  $\Phi$  y por consiguiente el par de arranque.

## Velocidad y momento

- Ídem excitación independiente.
- Velocidad varía con la tensión en menor grado que en las de excitación independiente, porque:

$$n = f(U/\Phi)$$



- cuando disminuye  $U$ ,
- disminuye  $I_d$ ,
- disminuye el flujo,
- aumenta la velocidad.



# Motor serie

## Arranque

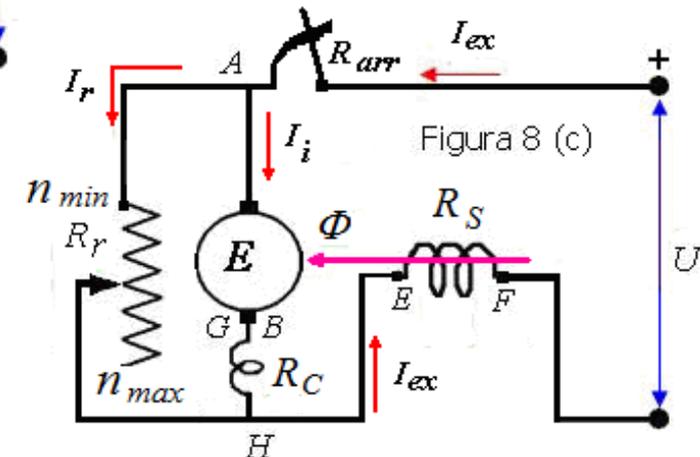
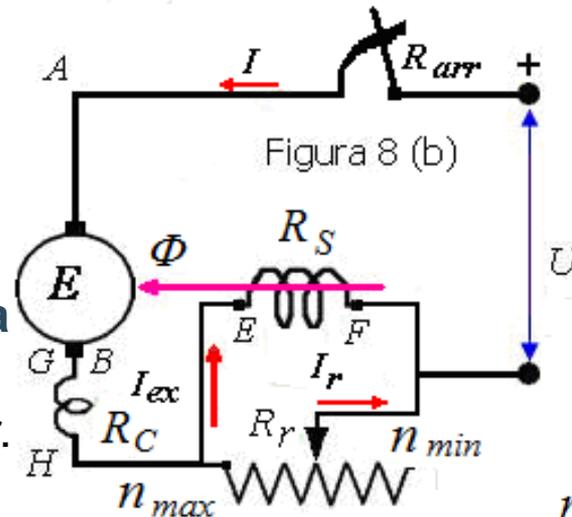
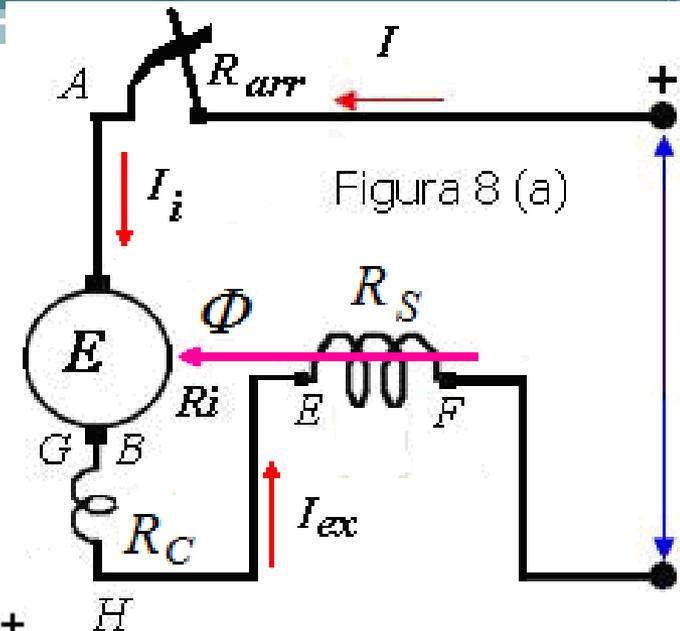
- De necesitarse arranque con corriente reducida, la  $R_A$  va en serie con el motor.
- Considerar la reducción de par que trae aparejada.

## Velocidad

1. Variando la tensión  $U$ .
2. Variando la excitación  $\Phi$ .

a) Con  $R_r$  en paralelo con la excitación: en tracción eléctrica. Se puede embalar.

b) Con  $R_r$  en paralelo con el inducido: ventaja de no embalsarse.  $I_{ex} = I_i + I_r$



## • Motor serie: Curvas Características

Siendo  $\tau = K_\tau \Phi \cdot I_i$  y considerando que  $\Phi = K_\phi \cdot I$  resulta  $\tau = K_\tau K_\phi \cdot I^2$  será:

$$I = \sqrt{\frac{\tau}{K_\tau \cdot K_\phi}} \quad \text{Lo que nos conduce a una característica velocidad-par:}$$

$$n = \frac{U - R_i \cdot I}{K_E \cdot \Phi} = \frac{U}{K_E \cdot K_\phi \cdot I} - \frac{R_i}{K_E \cdot K_\phi} = \frac{1}{K_E} \cdot \sqrt{\frac{K_\tau}{K_\phi}} \cdot \frac{U}{\sqrt{\tau}} - \frac{R_i}{K_E \cdot K_\phi}$$

$$n = a \cdot \frac{U}{\sqrt{\tau}} - b ; \text{ donde } a = \frac{1}{K_E} \cdot \sqrt{\frac{K_\tau}{K_\phi}} \quad ; \quad b = \frac{R_i}{K_E \cdot K_\phi}$$

La curva  $n = f(\tau)$  tiene forma hiperbólica y se aparta tanto mas de ella

Cuanto más se satura la máquina. El par de arranque para  $n = 0$  vale:

$$\tau_{arr} = \frac{a^2}{b^2} \cdot U^2$$

# Motor serie

## Curvas características

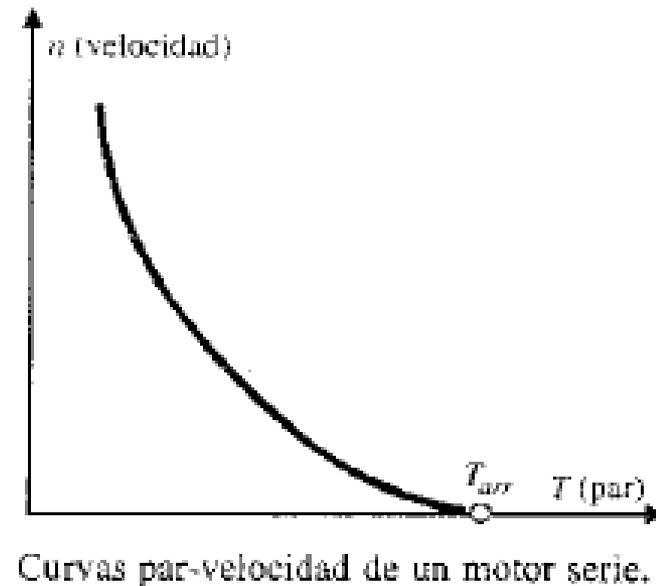
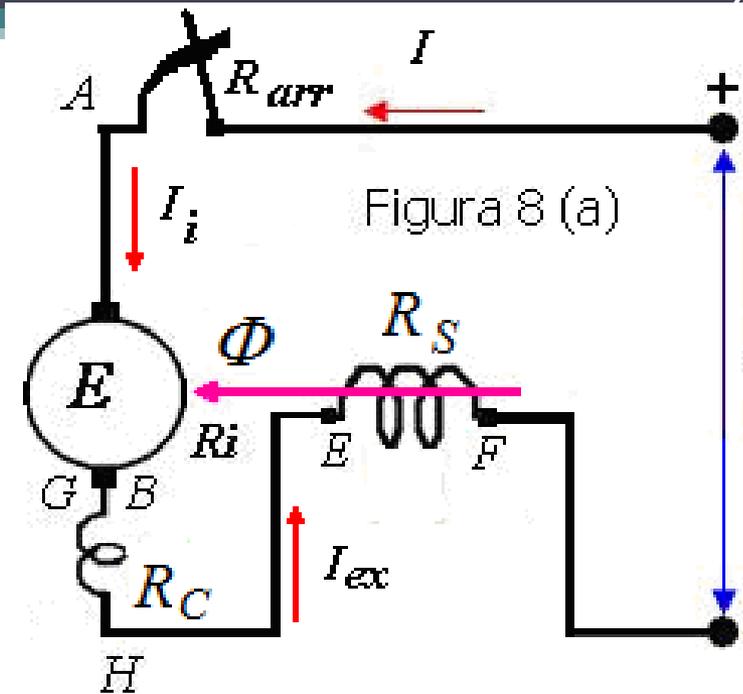
- $n = f(\tau)$   $\tau = K_{\tau} \phi \cdot I$
- Si aumenta el par al doble  $\tau' = 2\tau$ ,
- aumenta la corriente absorbida  $I' = 1,4 \cdot I$
- aumenta el flujo  $\phi$ ,
- disminuye la velocidad  $n$  al 70% de la inicial, según la hipérbola.

$$\bullet I = f(\sqrt{\tau}) \quad n = f\left(\frac{1}{\phi}\right) = f\left(\frac{1}{\sqrt{\tau}}\right)$$

$$n = a \cdot \frac{U}{\sqrt{\tau}} - b \quad \rightarrow \quad \text{La curva es una hipérbola}$$

Gran par a baja velocidad, ideal en el arranque.

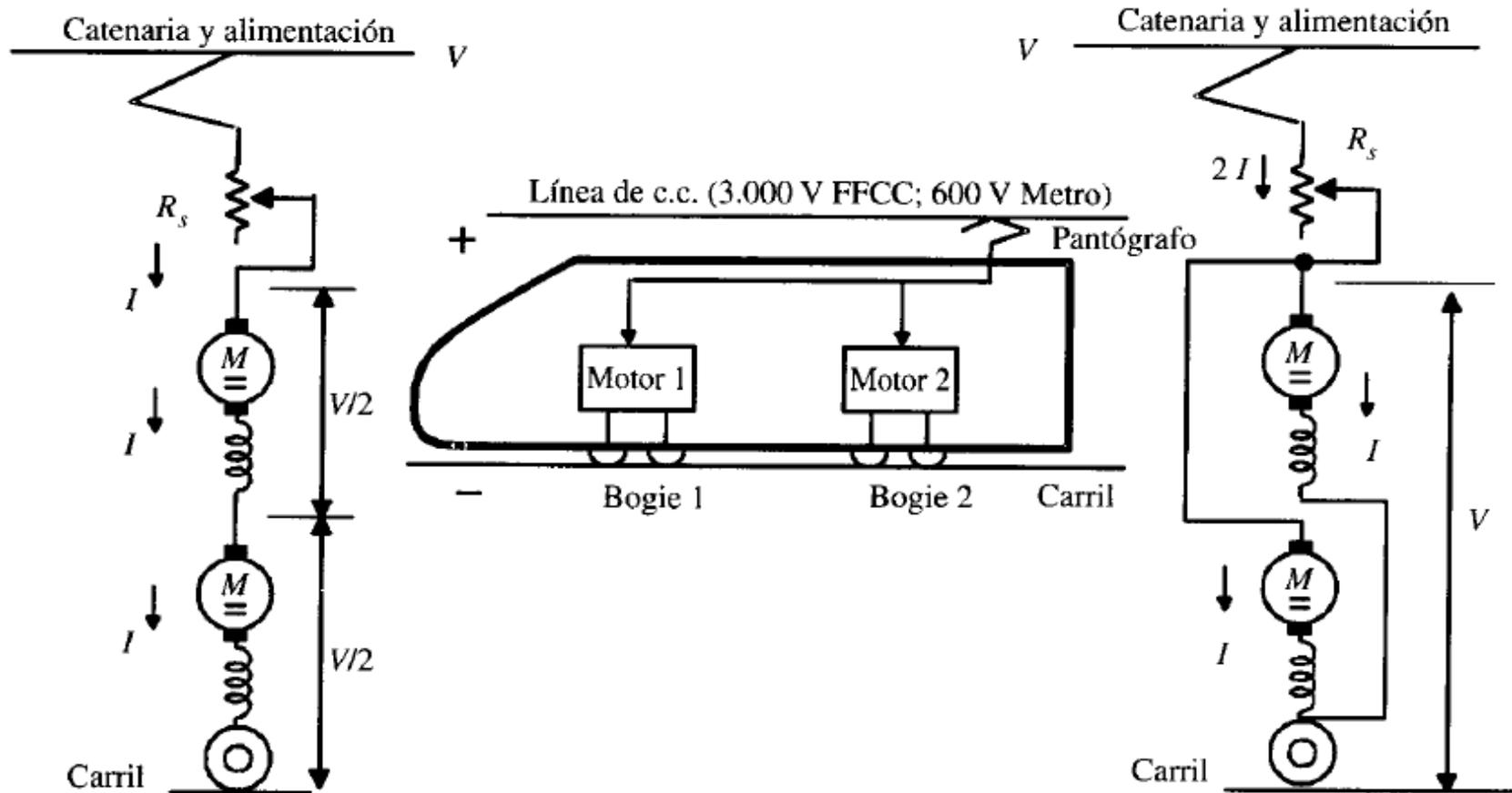
$$\tau_{arr} = \frac{a^2}{b^2 U^2}$$



# Ejemplo de aplicación de motor serie

$$n = \frac{U_i - R_i \cdot I}{K_E \cdot \Phi} \approx \frac{U_i}{K_E \cdot \Phi} = \frac{U_i}{K_E \cdot K_1 \cdot I} = C_1 \frac{U_i}{I}$$

$$T = K_T \cdot \Phi \cdot I = K_T \cdot K_1 \cdot I^2 = C_2 \cdot I^2$$



CONEXIÓN SERIE DE LOS MOTORES

CONEXIÓN PARALELO DE LOS MOTORES

Conexión en serie y en paralelo de motores serie de c.c. en tracción eléctrica.

- Acoplamiento en serie y en paralelo de motores serie para tracción

Conexión Serie  $U_i = U/2$  ;  $I_i = I$

$$n_s = C_1 \cdot \frac{U/2}{I} \quad ; \quad \tau_s = C_2 \cdot I^2$$

Conexión Paralelo:  $U_i = U$  ;  $I_i = I$

$$n_p = C_1 \cdot \frac{U}{I} = 2 \cdot n_s \quad ; \quad \tau_p = C_2 \cdot I^2 = \tau_s$$

Conclusión: a igualdad de par puede conseguirse el doble de velocidad solo cambiando la conexión de SERIE a PARALELO

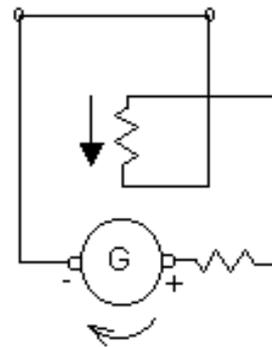
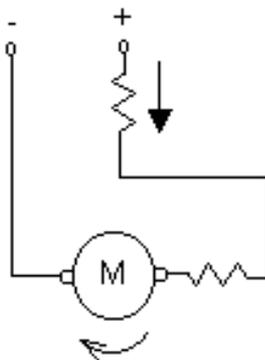
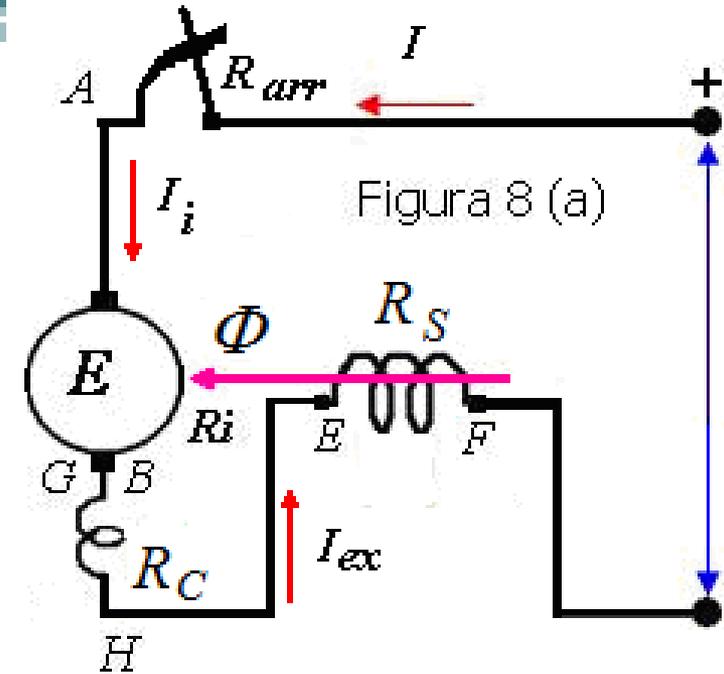
# Motor Serie

## Inversión de marcha

- Ídem anterior.
- Al invertir la polaridad de los bornes gira en igual sentido. Motor universal.

## Frenado

- Ídem derivación.



Frenado como generador en igual sentido (vehículo)

# Motor compuesto

## Arranque, par y velocidad

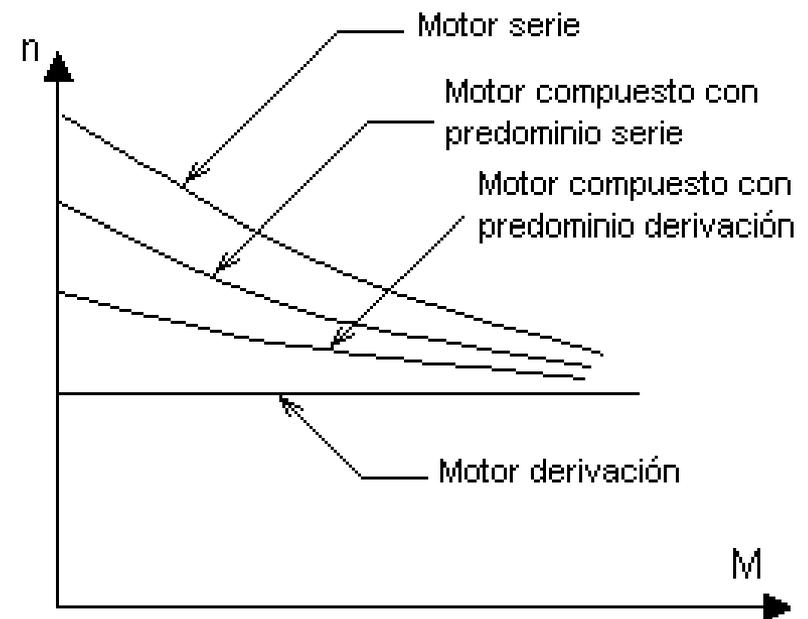
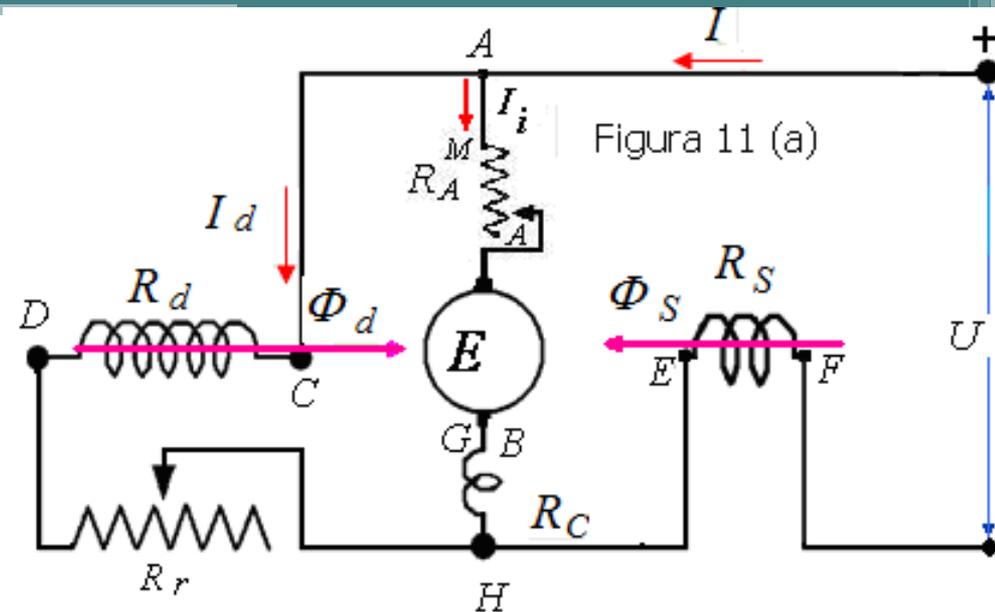
Ídem casos anteriores.

## Inversión de marcha y frenado

Ídem casos anteriores.

## Curvas características

- Este motor no se embala porque al tener arrollamiento derivación las curvas siempre cortan el eje de ordenadas.
- No se usa el motor compuesto diferencial porque al disminuir el flujo le quita par.



- Frenado Eléctrico y Frenado mecánico
- (a) Frenado Regenerativo o por recuperación de energía
- Aplicable a tracción eléctrica, aparatos de elevación y transporte como ascensores, montacargas, grúas y otros

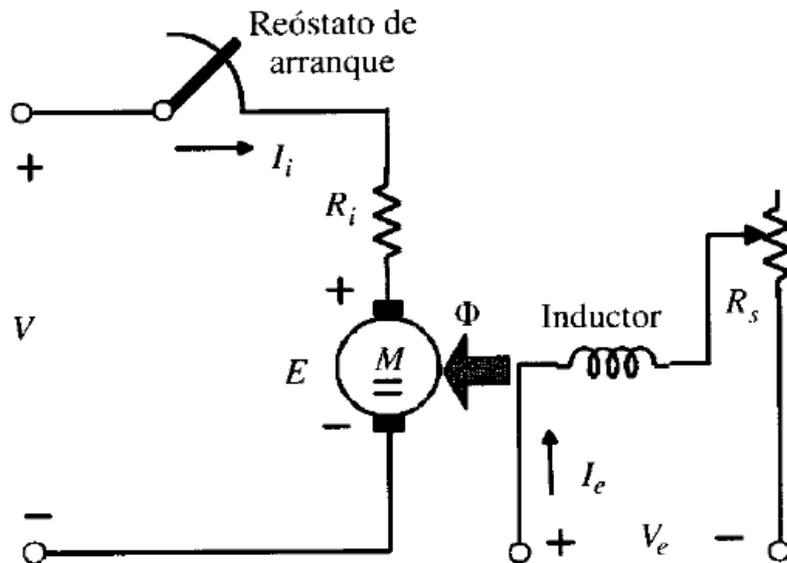
$$U = E = K_E \cdot \Phi \cdot n_0 \Rightarrow n_0 = U / K_E \cdot \Phi$$

Y al Motor Serie ¿se lo puede hacer trabajar en estas condiciones?

La maquina en B  $\rightarrow \tau = 0$

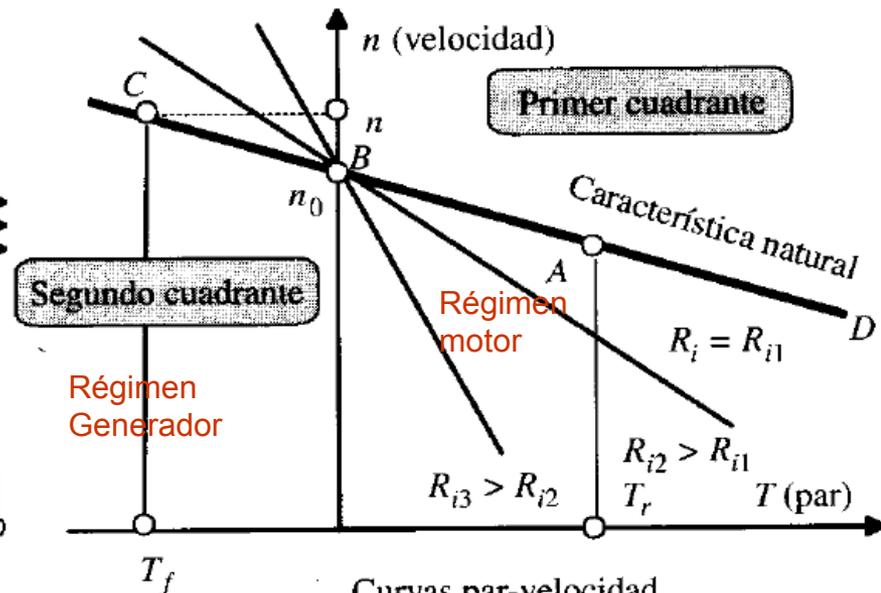
entonces  $I_i = 0$

$$n = \frac{V}{K_E \Phi} - \frac{R_i}{K_E K_T \Phi^2} T$$



Motor con excitación independiente

Frenado regenerativo o por recuperación de energía.

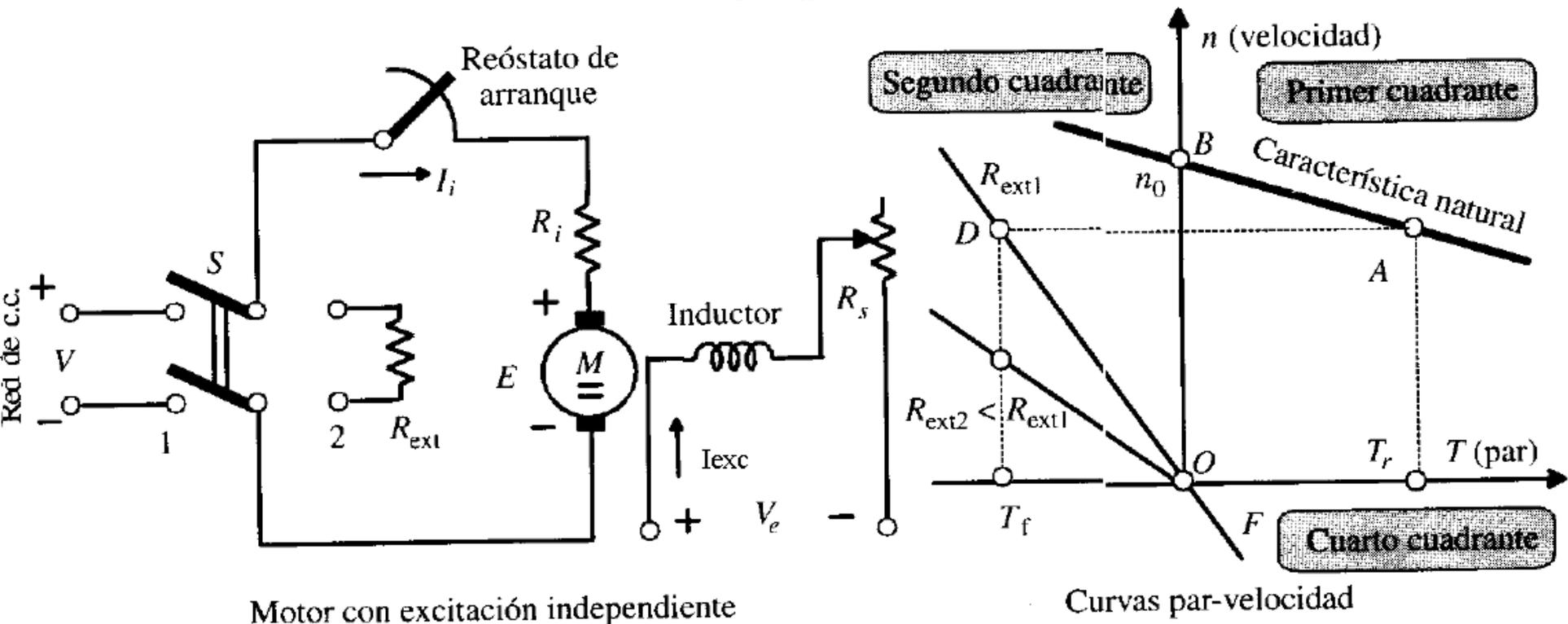


Curvas par-velocidad

- (b) Frenado reostático o por disipación de energía

$$I = -\frac{E}{R_i + R_{ext}} = -\frac{k_E \cdot n \cdot \Phi}{R_i + R_{ext}}; \tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i = \frac{K_\tau \cdot K_E \cdot n \cdot \Phi^2}{R_i + R_{ext}};$$

$$\text{entonces } n = -\frac{\tau \cdot (R_i + R_{ext})}{K_\tau \cdot K_E \cdot \Phi^2}$$

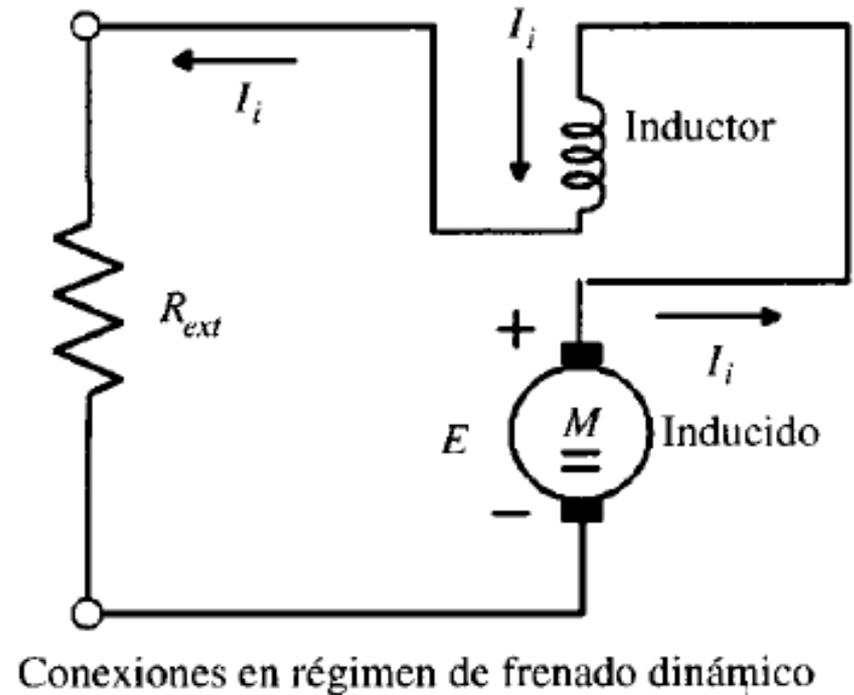
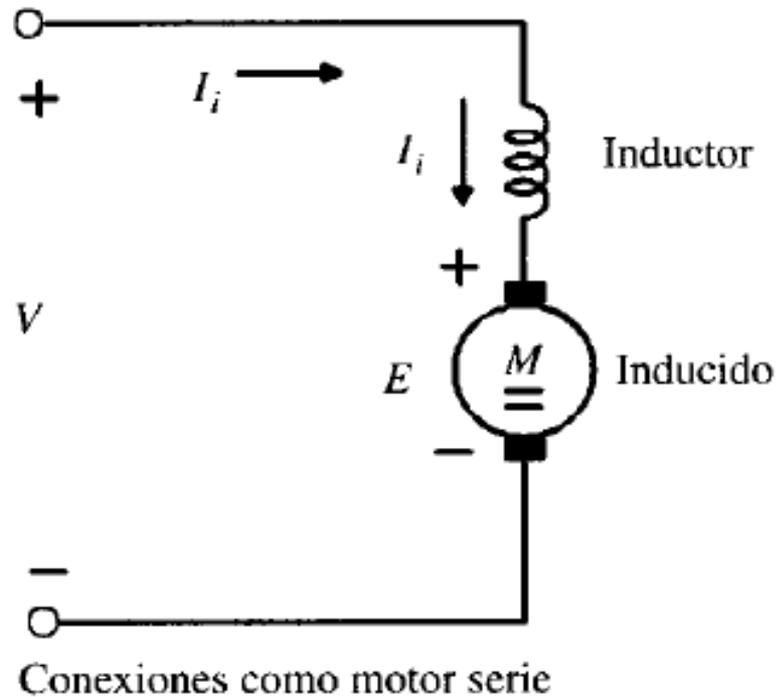


Motor con excitación independiente

Curvas par-velocidad

Frenado reostático de un motor de c.c. con excitación independiente.

- Frenado dinámico de un motor Serie



## • (c) Frenado por contracorriente

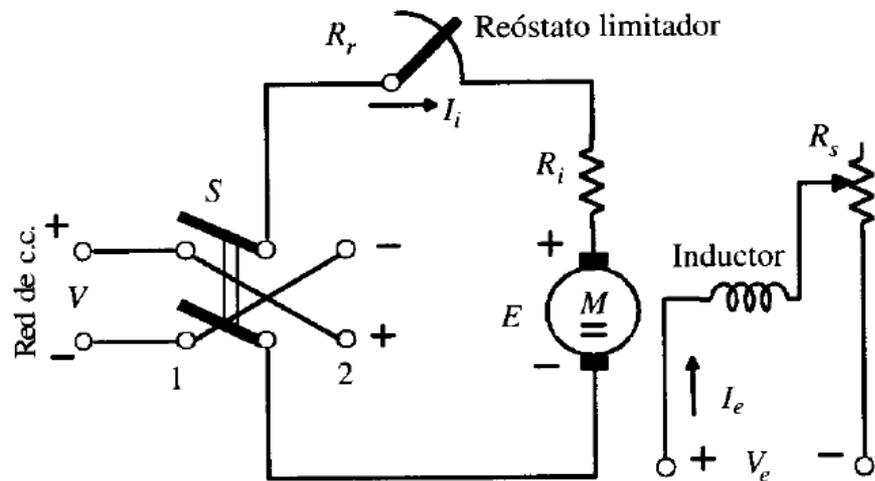
Si S está en (1) régimen Motor e  $I_i = \frac{U - E}{R_i}$  en el sentido del dibujo. Si  $R_r = 0$

recta BA y el par  $\tau_r$  corresponde al punto A.

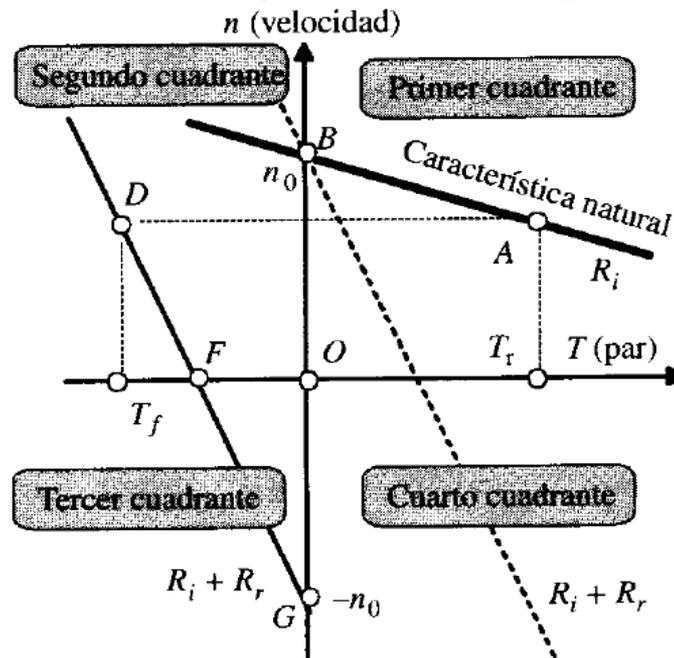
Cdo. S pasa a 2 la fem E invariable y la corriente  $I_i = -\frac{U + E}{R + R_r}$

$$n = -\frac{U}{K_E \cdot \Phi} - \frac{R_i}{K_E \cdot K_\tau \cdot \Phi^2} \cdot \tau$$

$$\tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i = -K_\tau \cdot \Phi \cdot \frac{U + E}{R_i + R_r} \Rightarrow n = -\frac{U}{K_E \cdot \Phi} - \frac{(R_i + R_r)}{K_\tau \cdot K_E \cdot \Phi^2} \cdot \tau \rightarrow DFG$$



Motor con excitación independiente

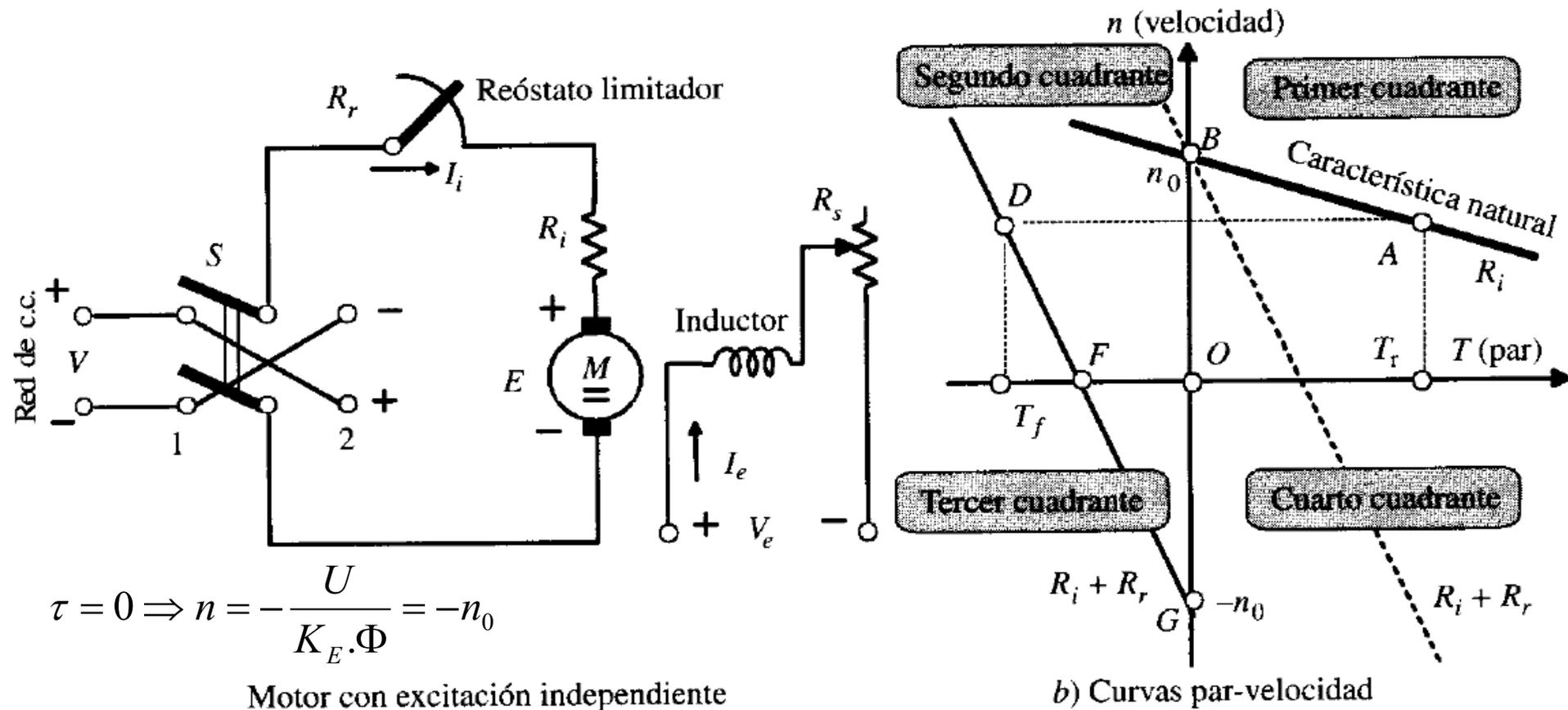


b) Curvas par-velocidad

Frenado a contracorriente de un motor de c.c. con excitación independiente.

## • (c) Frenado por contracorriente

$$\tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i = -K_\tau \cdot \Phi \cdot \frac{U + E}{R_i + R_r} \Rightarrow n = -\frac{U}{K_E \cdot \Phi} - \frac{(R_i + R_r)}{K_\tau \cdot K_E \cdot \Phi^2} \cdot \tau \rightarrow \text{recta DFG}$$



Frenado a contracorriente de un motor de c.c. con excitación independiente.

- Funcionamiento la Maq. de C.C. en los cuatro cuadra

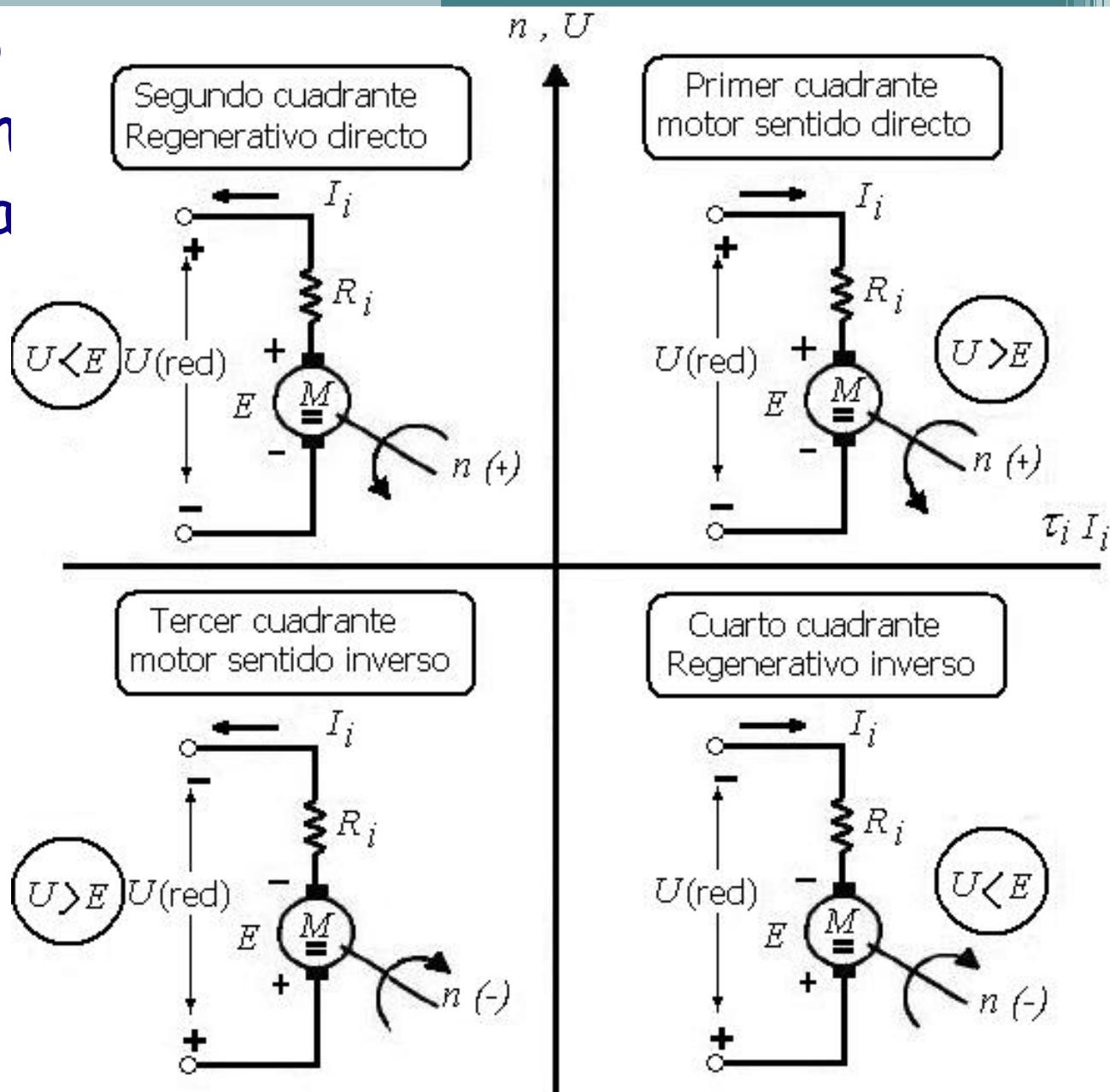


Figura 15 Funcionamiento de la maq. de c.c. en cuatro cuadrantes