

FACULTAD DE INGENIERIA  
en acción continua...

# MÁQUINA DE C.C.

Electrotecnia y Máquinas Eléctricas

20/02/2020

# Formas constructivas

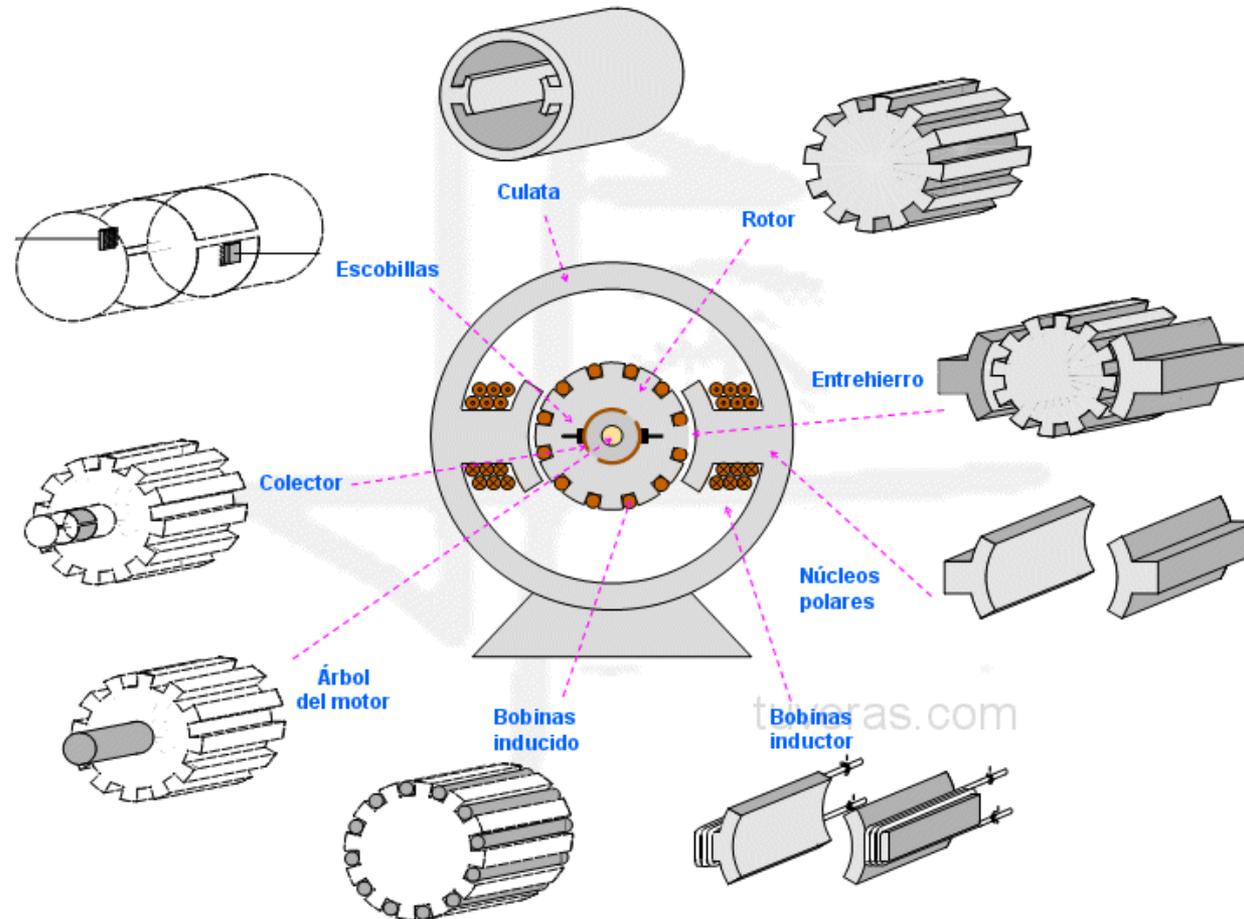
# Esquema básico

## Elementos móviles:

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

## Parte fija (estator):

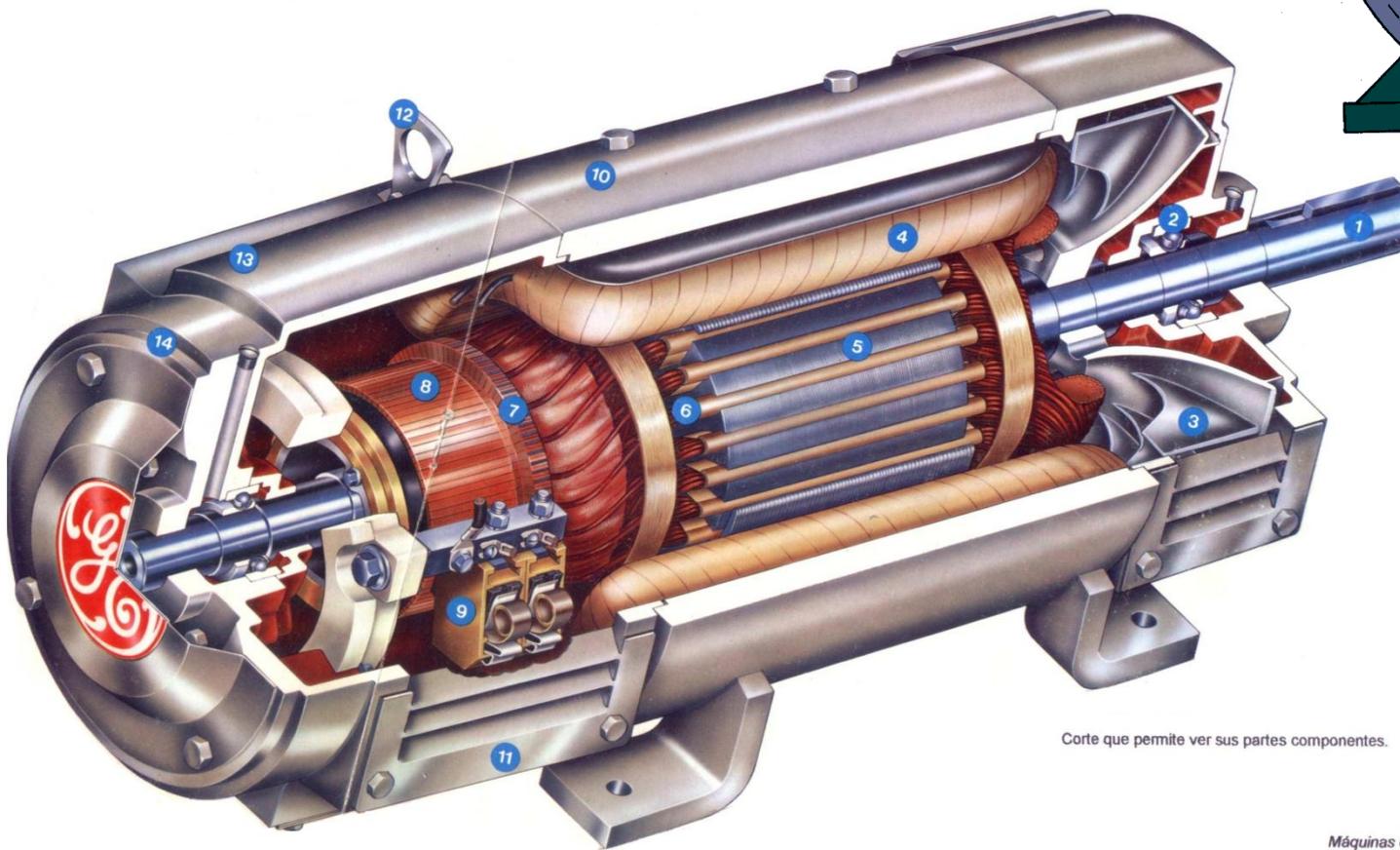
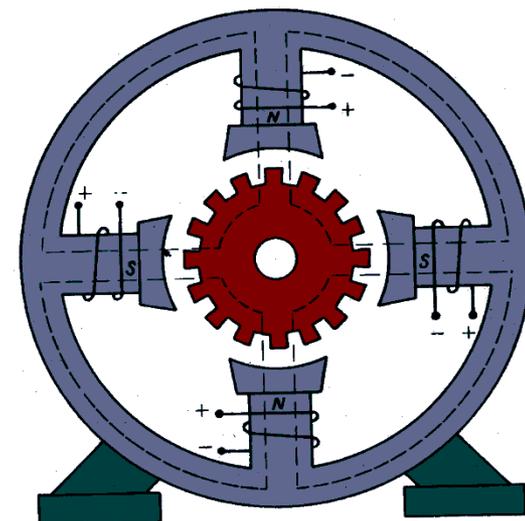
- Corona del estator (culata)
- Polos inductores (núcleo polar y expansiones polares)
- Polos de conmutación
- Devanados de excitación y conmutación.



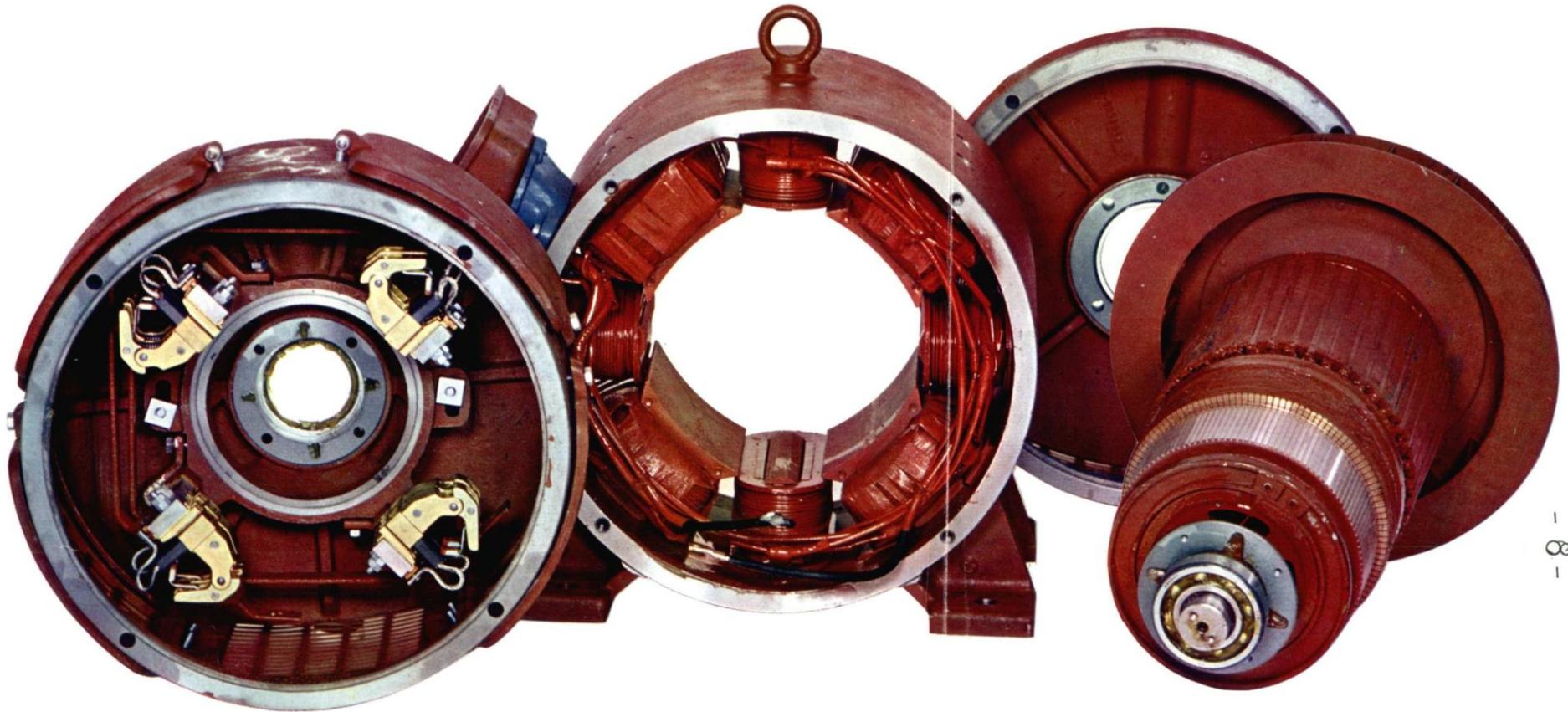
# Esquema básico

## Parámetros:

- potencia [kW], tensión, velocidad, forma de conexión, número de polos inductores.



Corte que permite ver sus partes componentes.



Motor para corriente continua tetrapolar.

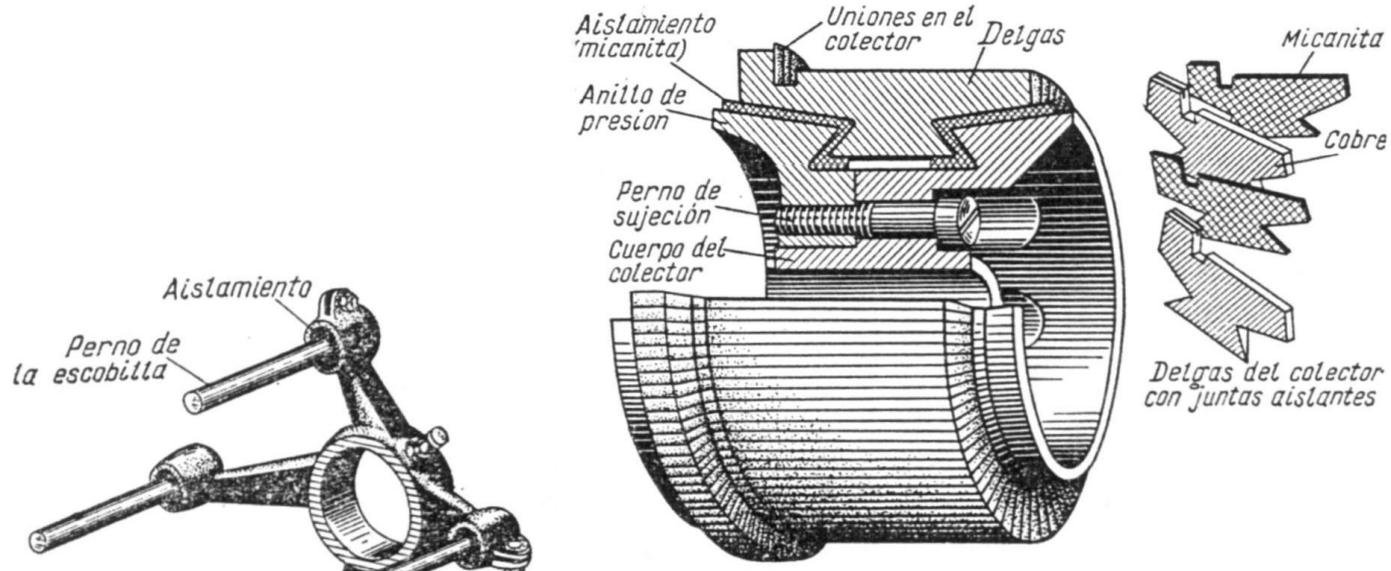


Fig. 292. Corte de un colector

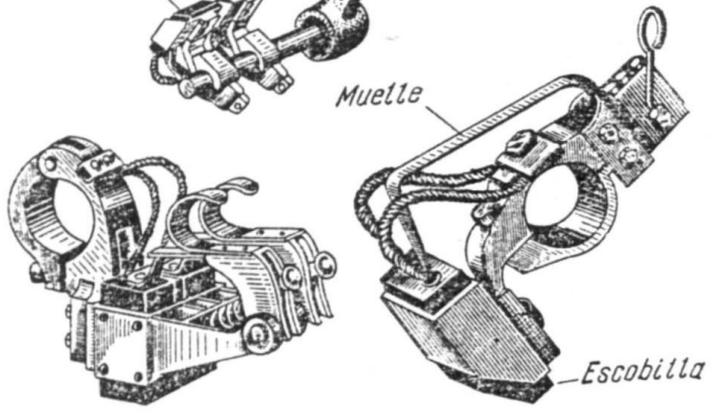
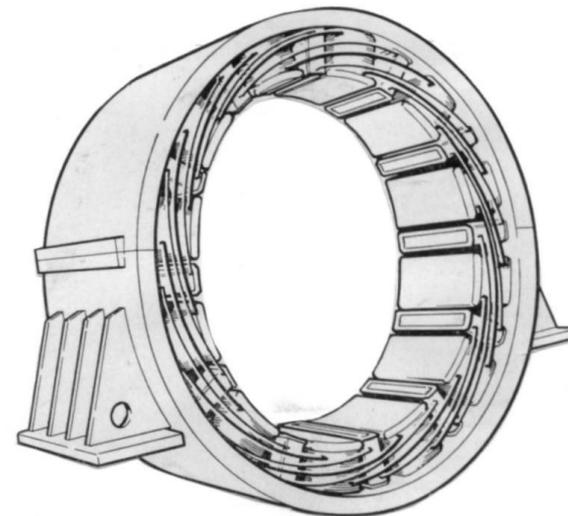


Fig. 293. Corona y portaescobillas



Estator de una máquina de gran potencia

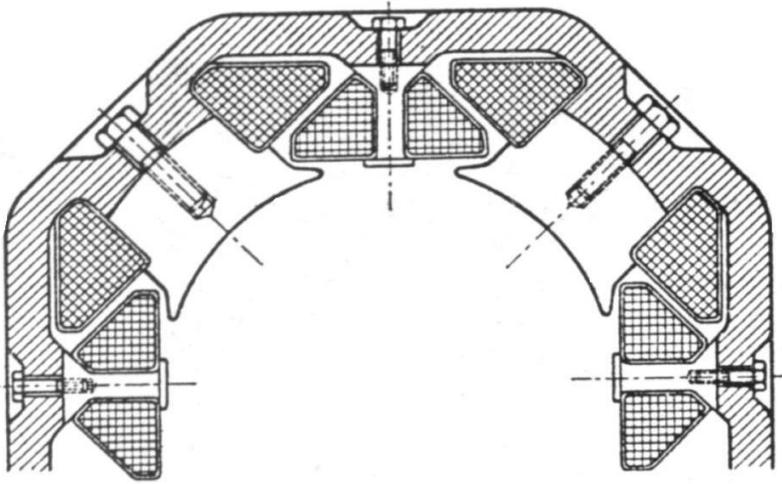


FIG. 104. Polos principales y de conmutación de un motor de tracción

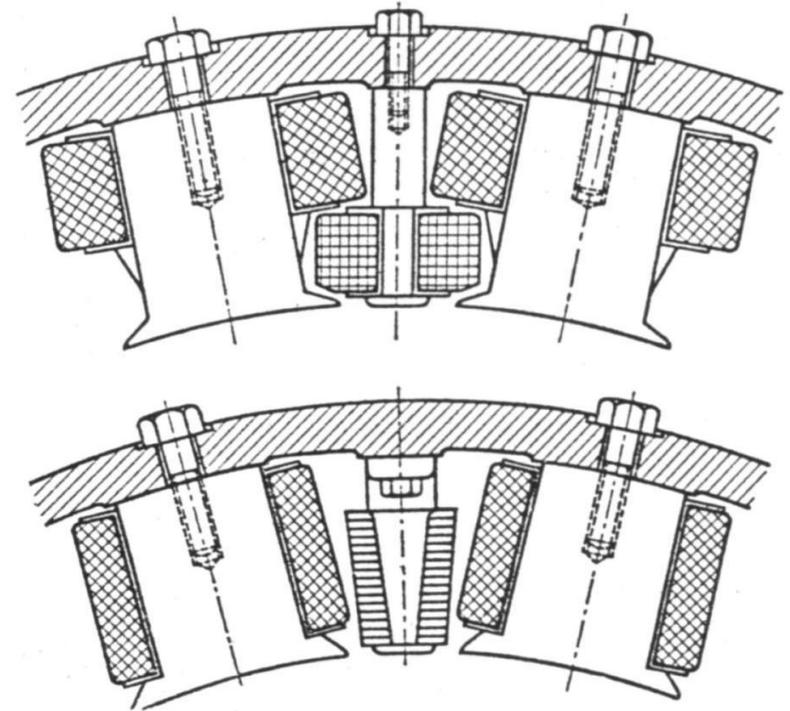


FIG. 105. Disposiciones de polos principales y de conmutación

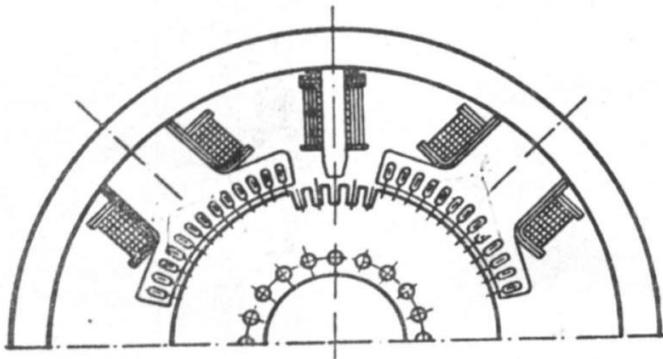


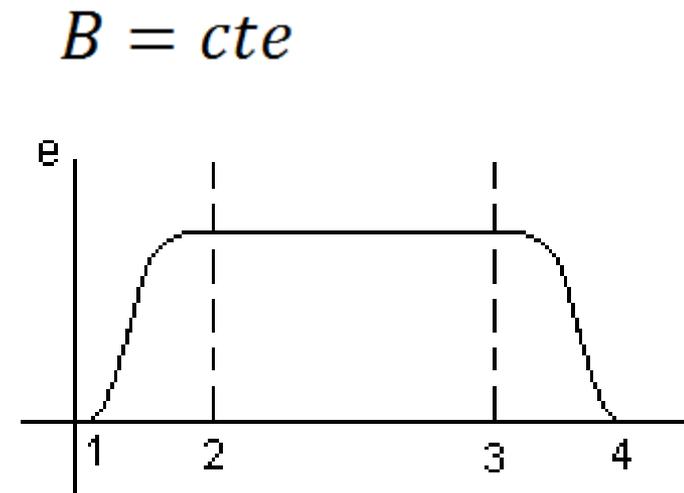
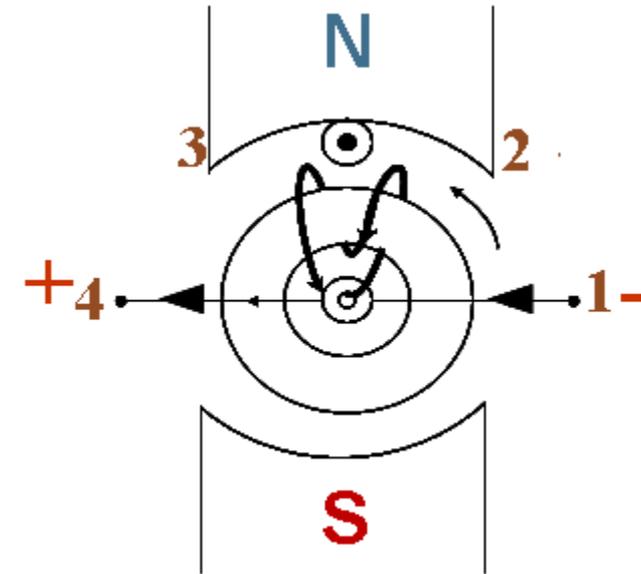
FIG. 106. Máquina con polos auxiliares y arrollamiento con pensador en las ranuras de las expansiones polares.

# 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. 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.



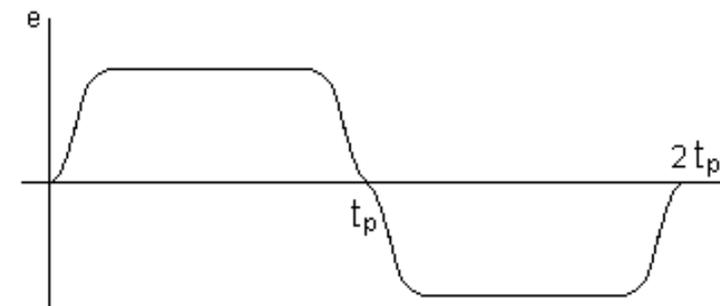
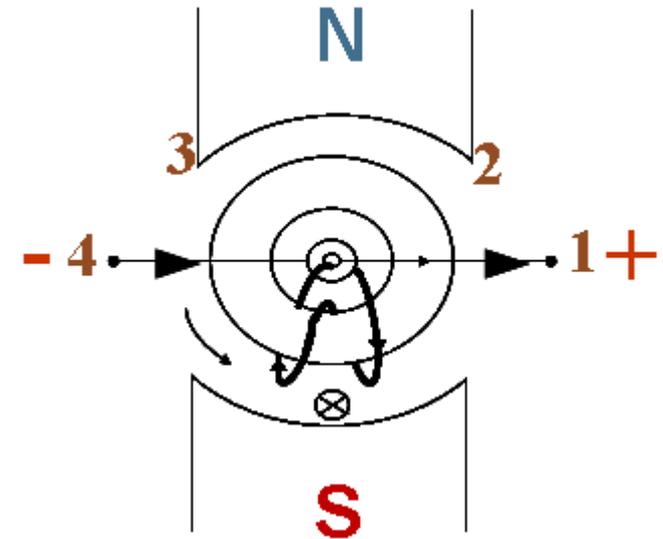
# Generación de la fem.

- **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 (-).



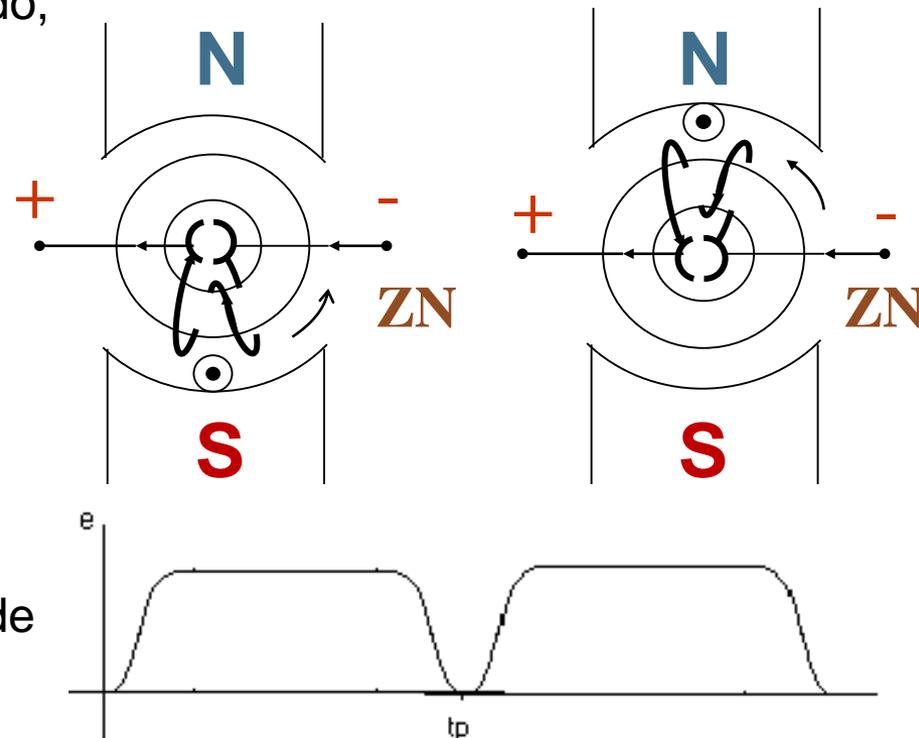
# Generación de la f.e.m.

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

*Las bobinas del inducido generan corrientes alternas, no senoidales.*

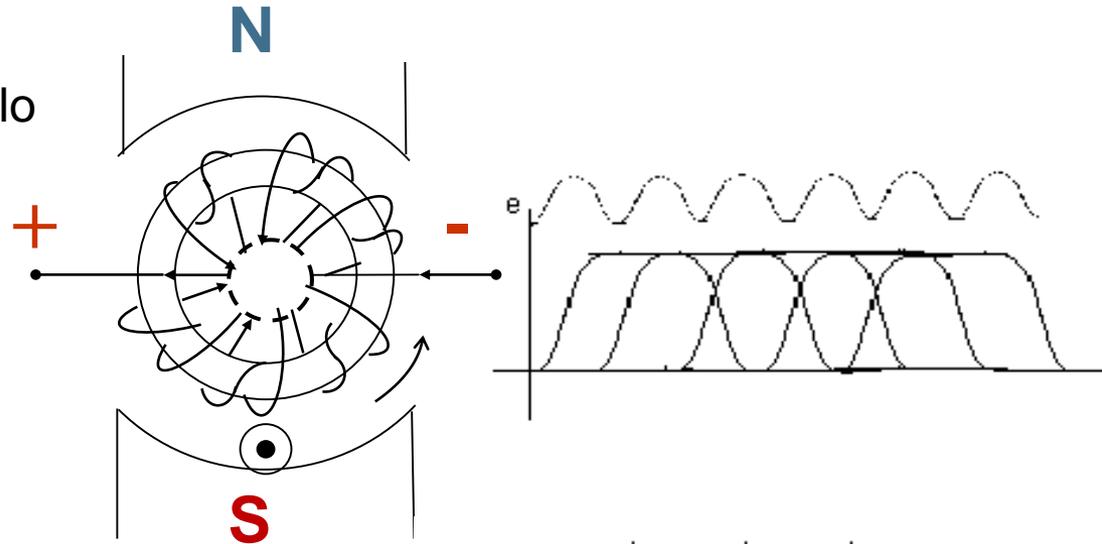
▪ **colector:** rectificador mecánico.  
Constituido por delgas:

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



# Generación de la fem.

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



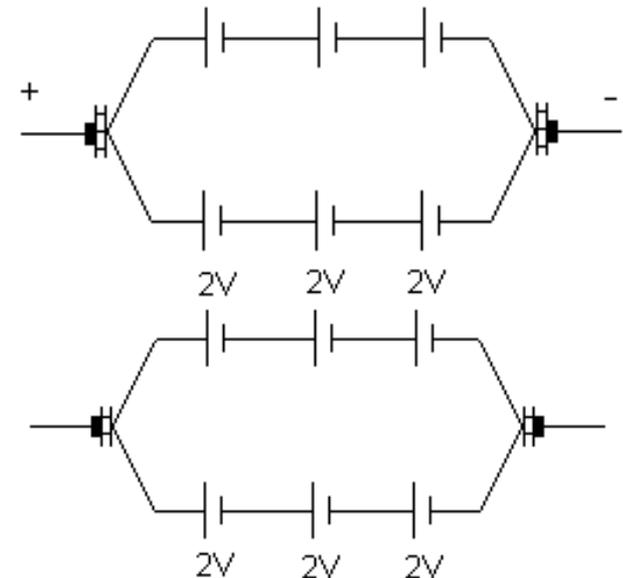
## ▪ circuito equivalente:

siendo:  $a$ : n° de pares de ramas.

$N$ : n° de conductores activos.

- conductor  $\Rightarrow$  1V
- bobina  $\Rightarrow$  2V (2 conductores por bobina)

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



# Expresión del valor medio de la f.e.m. continua

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

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

siendo:

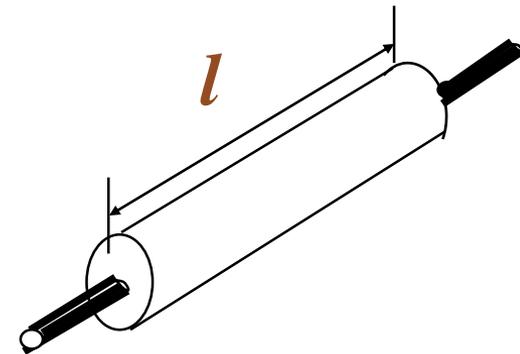
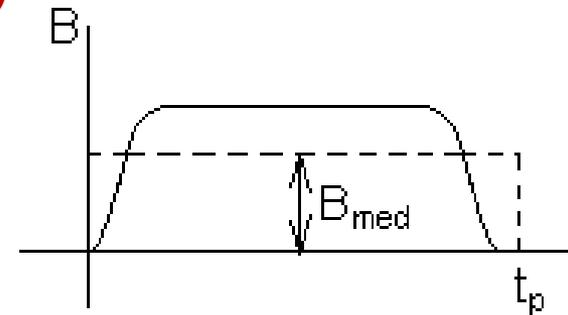
$$\Phi = B_{med} \cdot t_p \cdot l \quad [Wb]$$

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

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



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



# Excitación del campo inductor

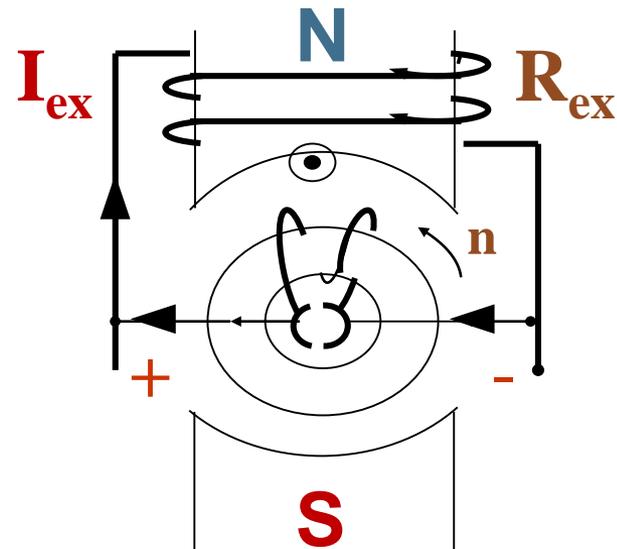
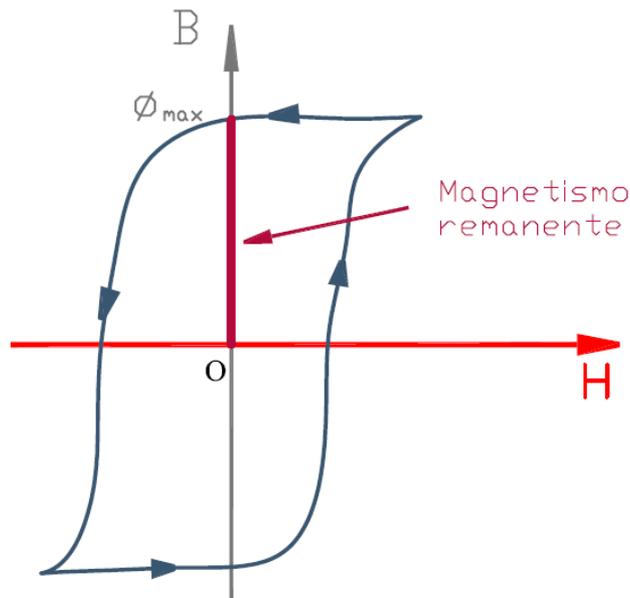
# Excitación del campo inductor

- 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 compuerta)

# Principio de autoexcitación

- 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 autoexcitación

## 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)

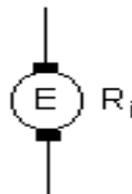
# Forma de conexión

*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

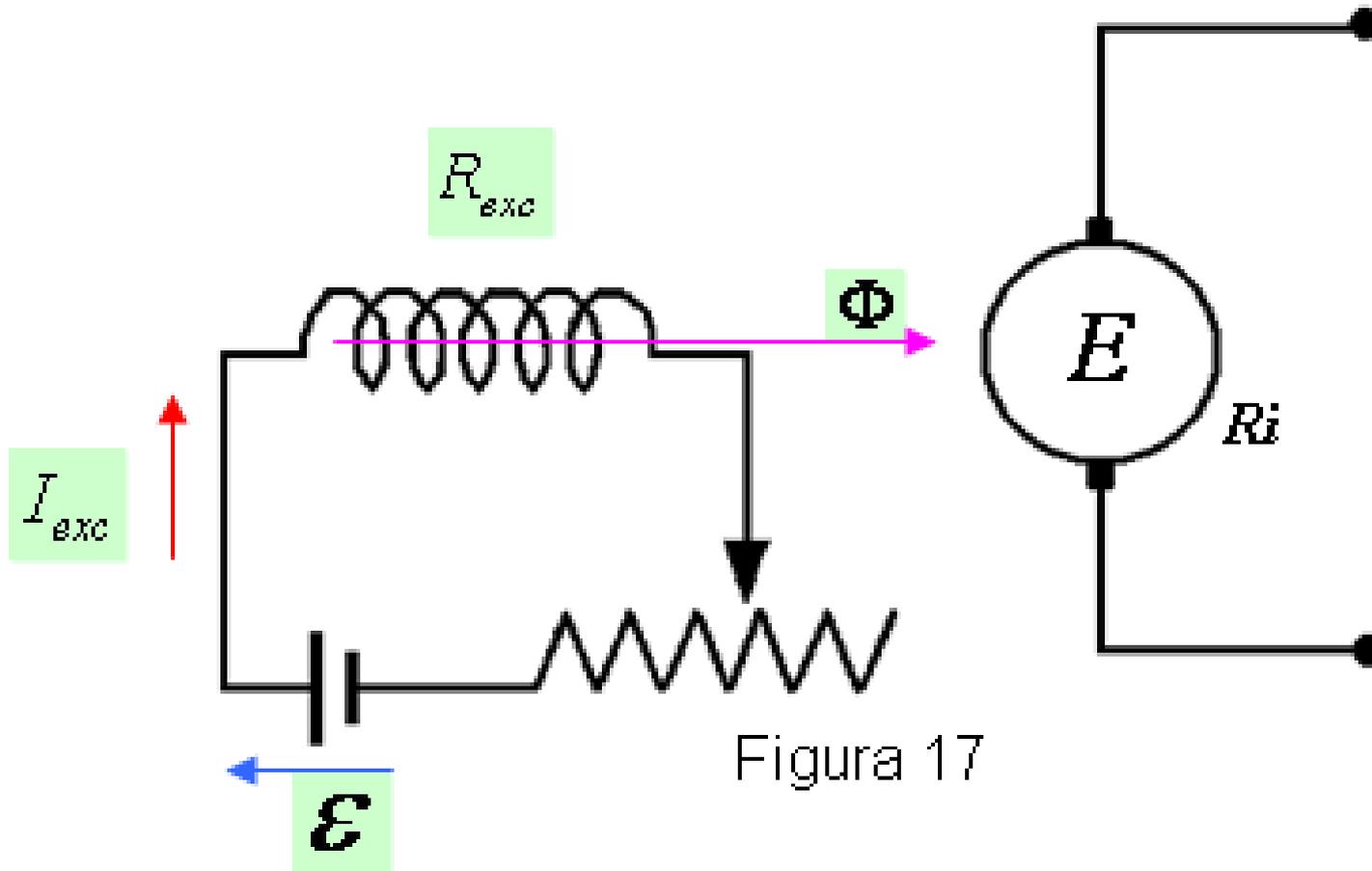
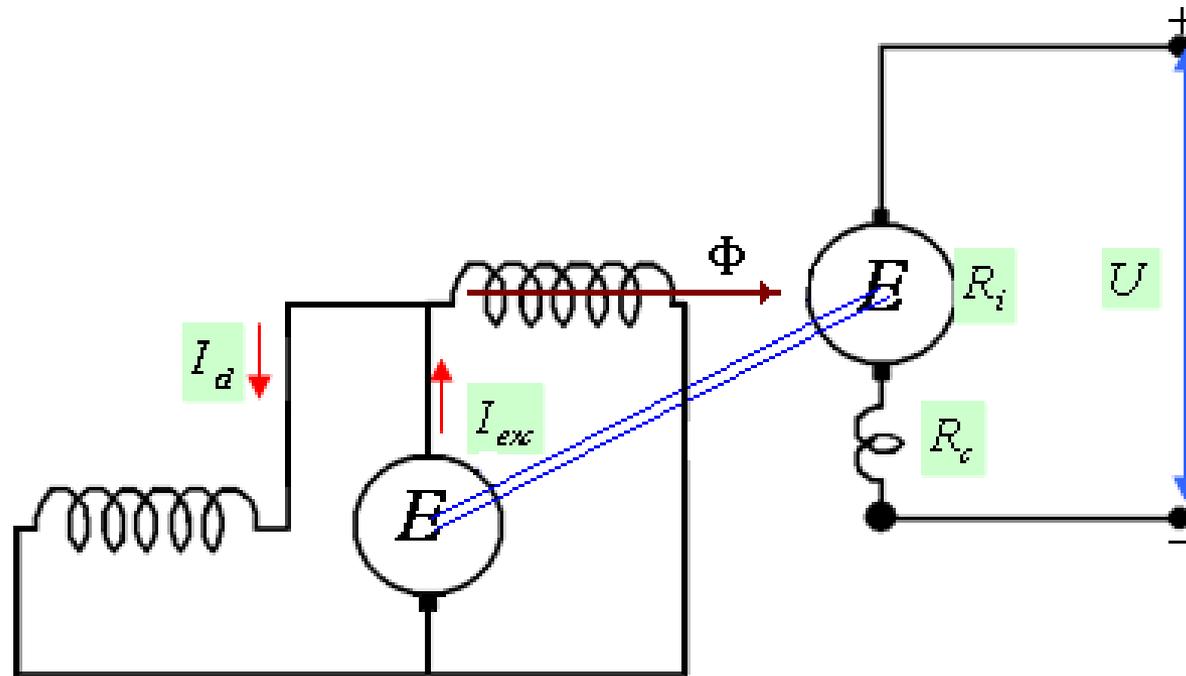


Figura 17

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

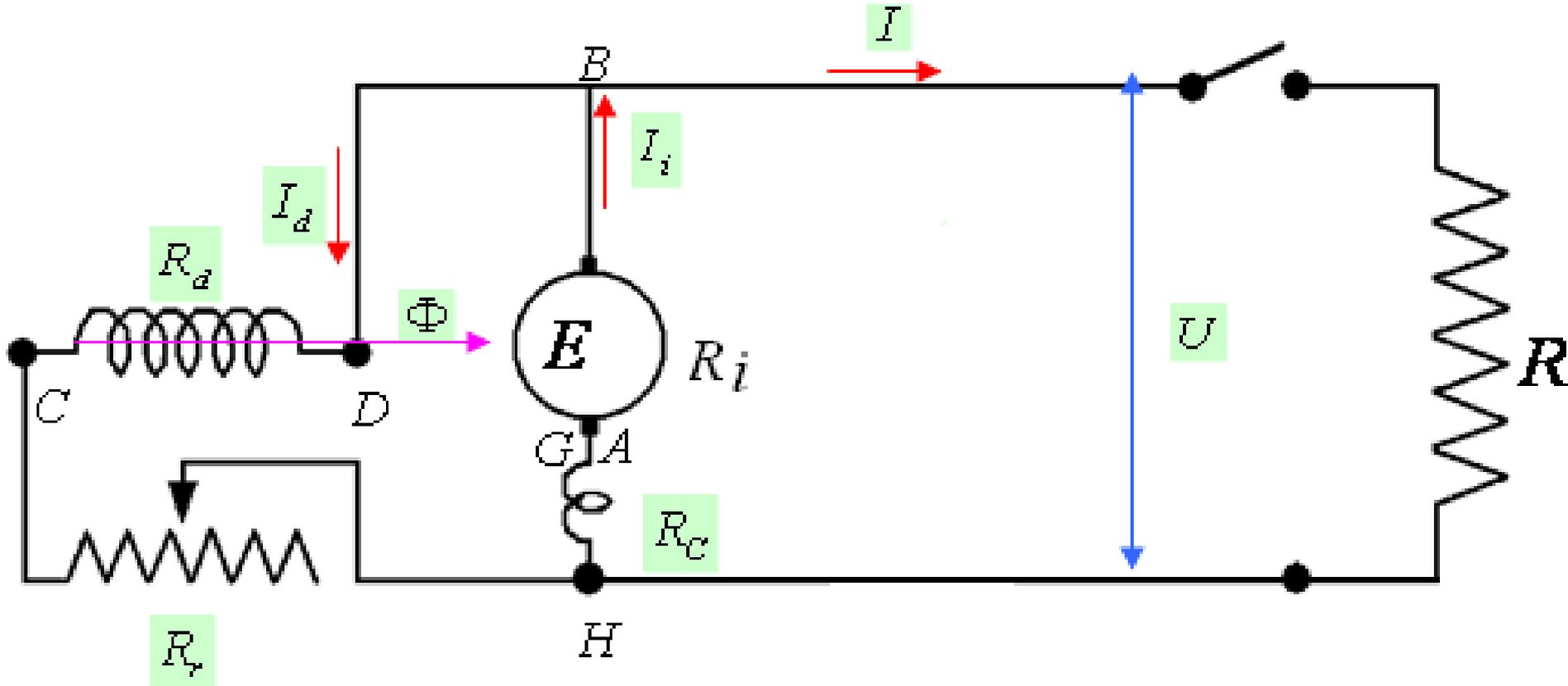
# Generador excitación propia



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

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

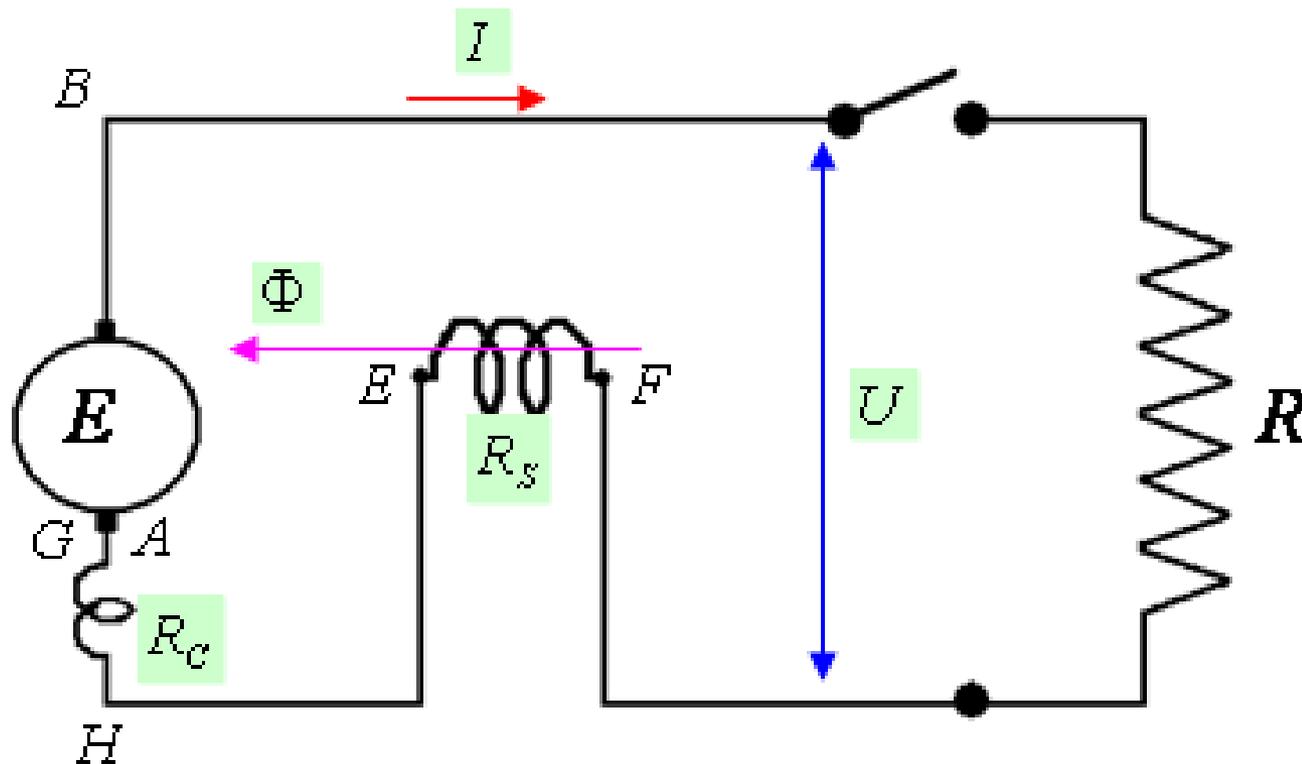
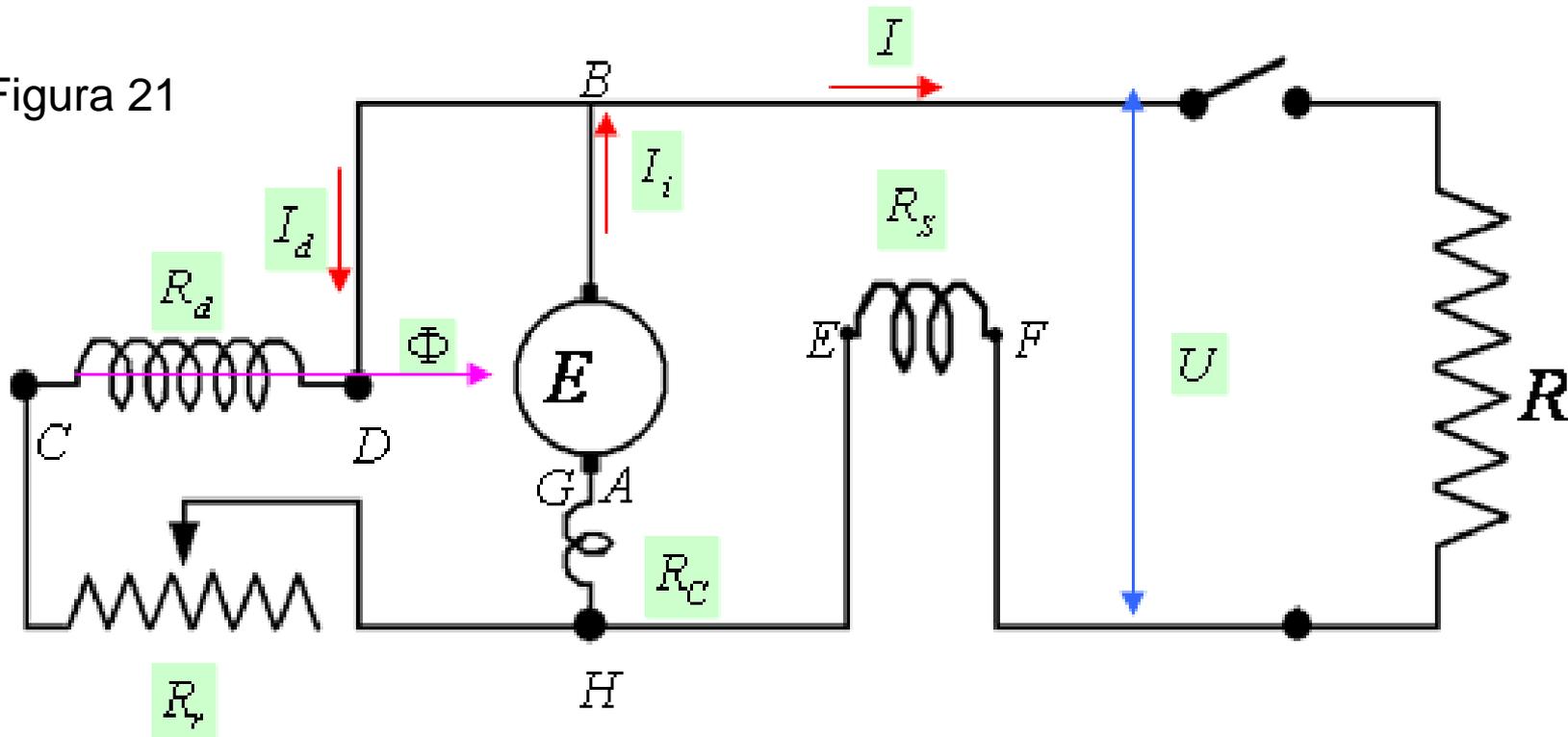


Figura 20

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

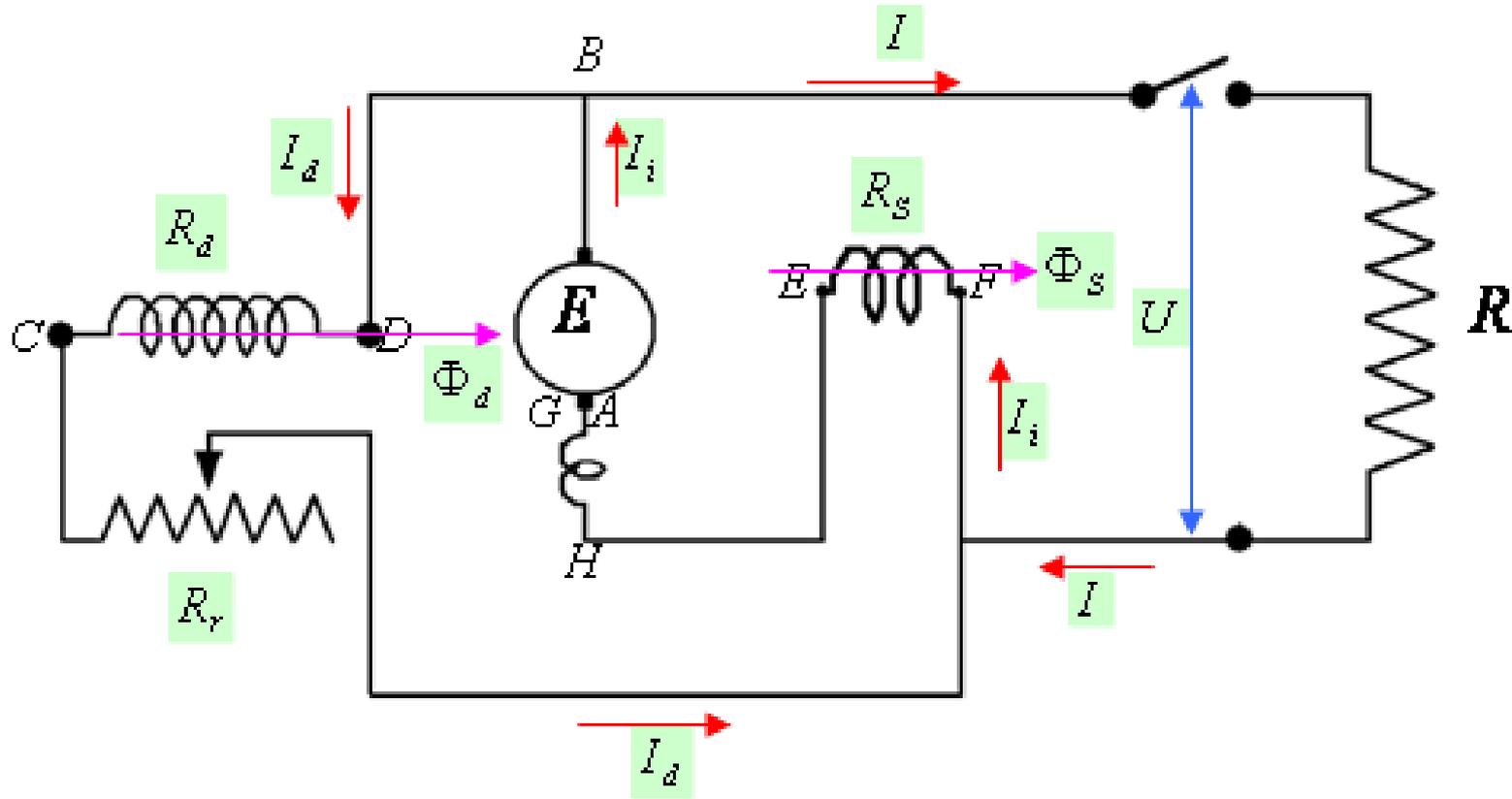
# Generador excitación compuesta corta

Figura 21



$$I_i = I + I_d \quad E = U + R_s I + (R_c + R_r) I_i \quad (R_d + R_r) I_d = U + R_s I$$

# Generador excitación compuesta larga



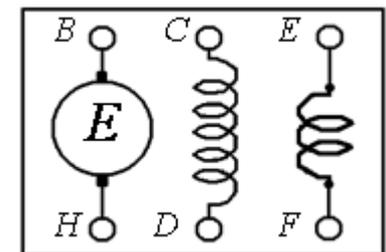
$$U = (R_d + R_r) I_d$$

Figura 22

$$I_i = I + I_d$$

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

Bornera Tipo



# Reacción del inducido

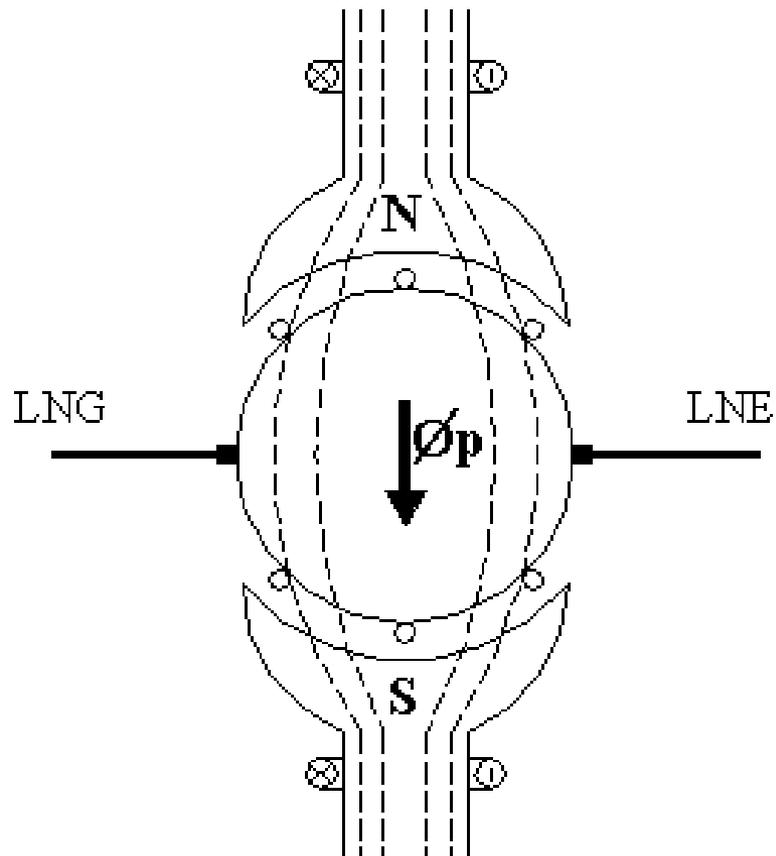


Figura 1

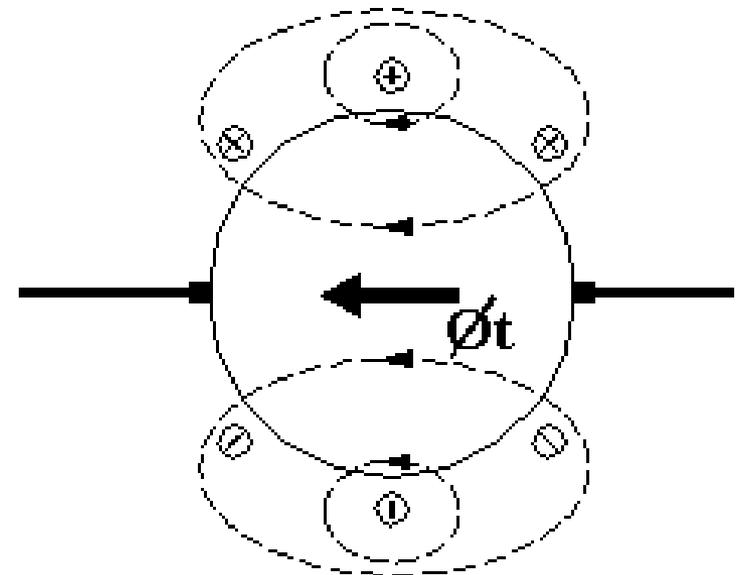
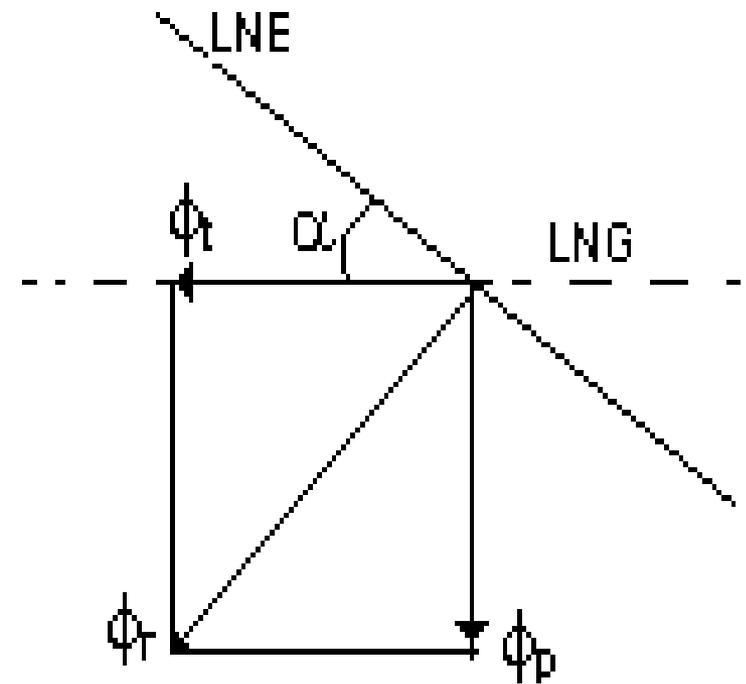
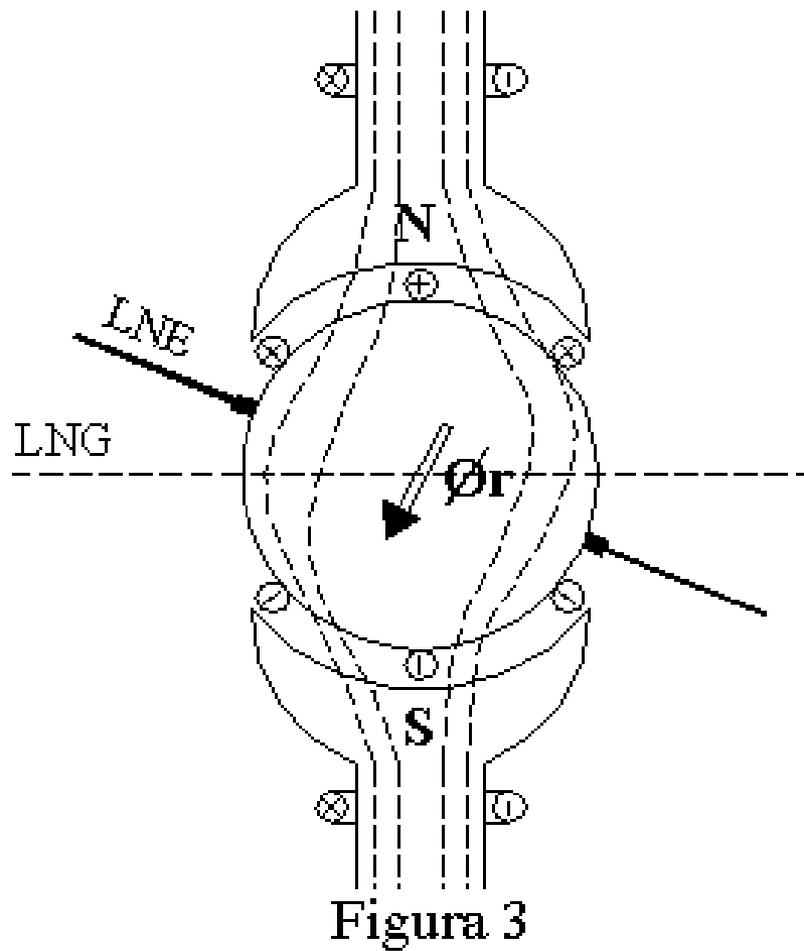
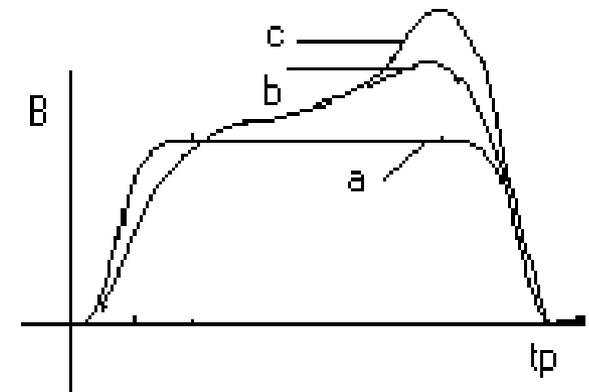
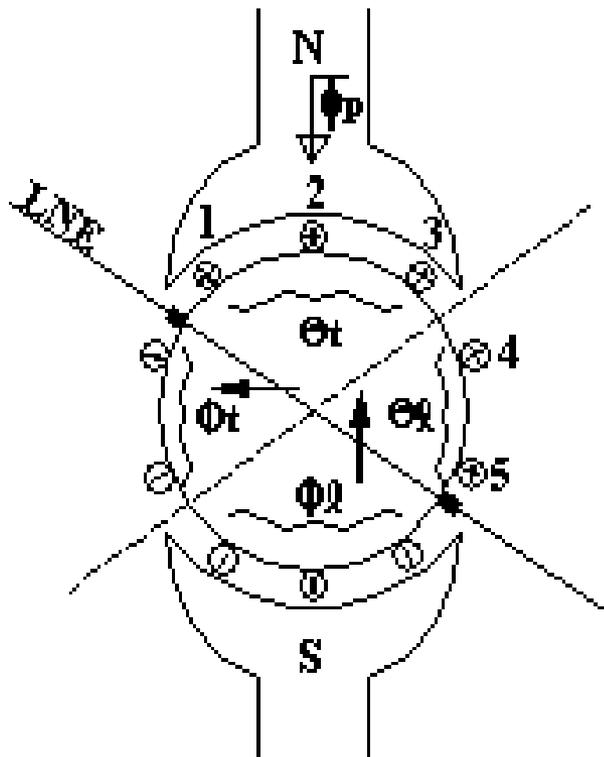


Figura 2



# Consecuencias de la reacción de inducido



# Reacción de Inducido

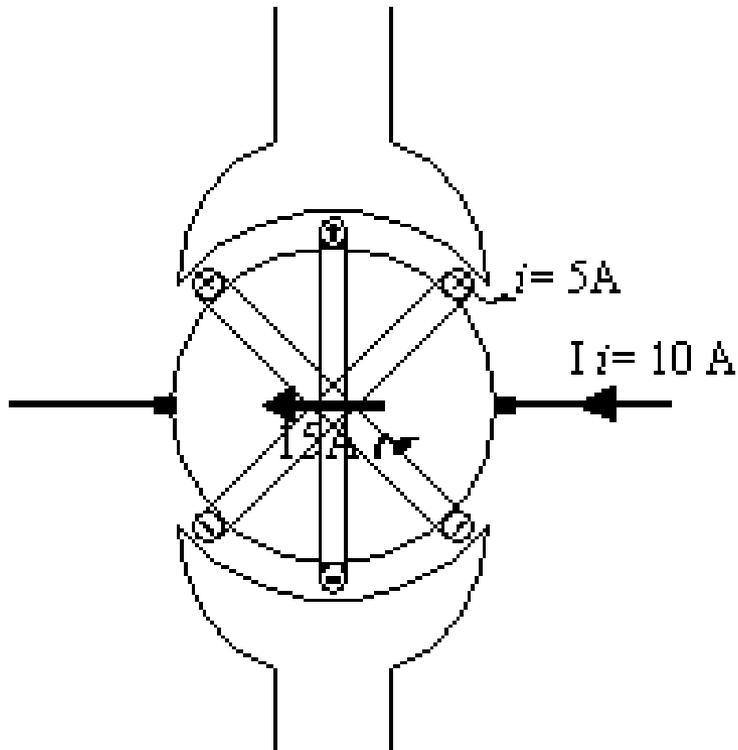


Figura 8

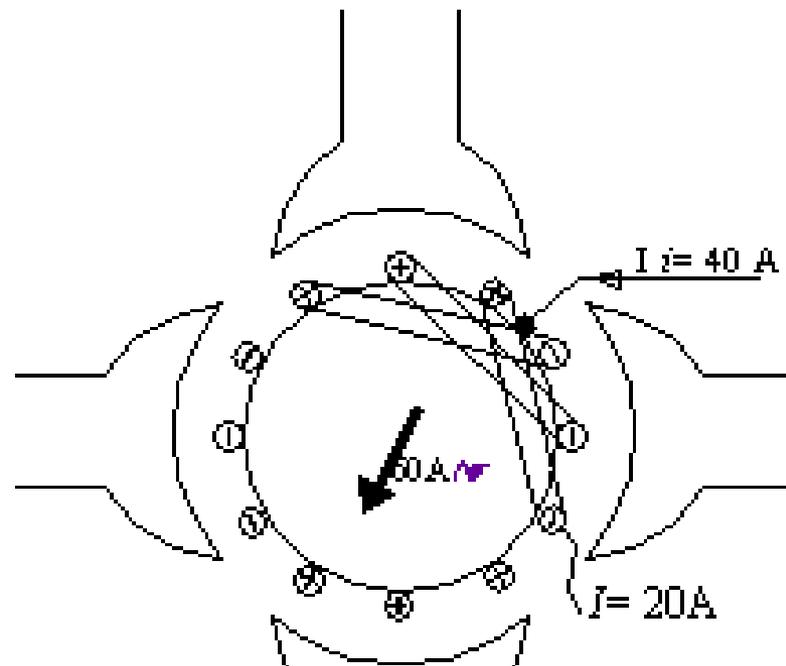
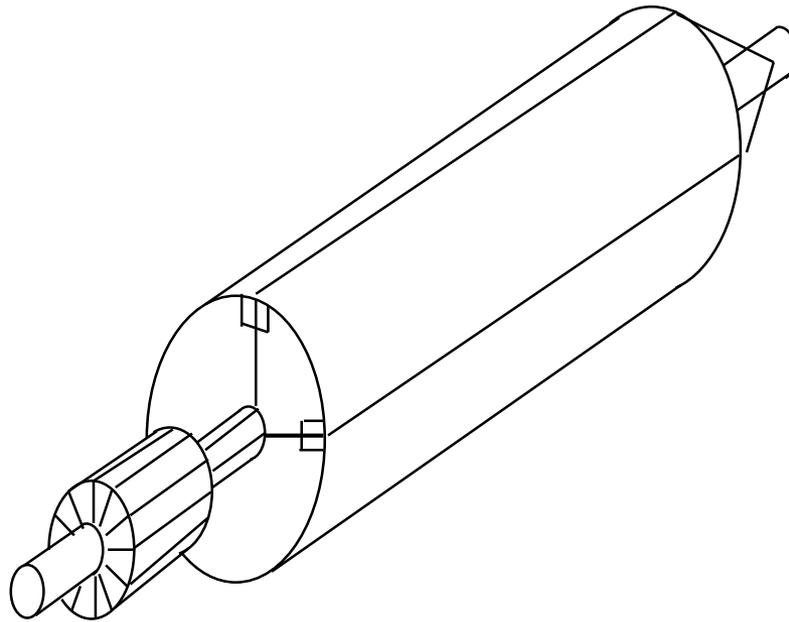
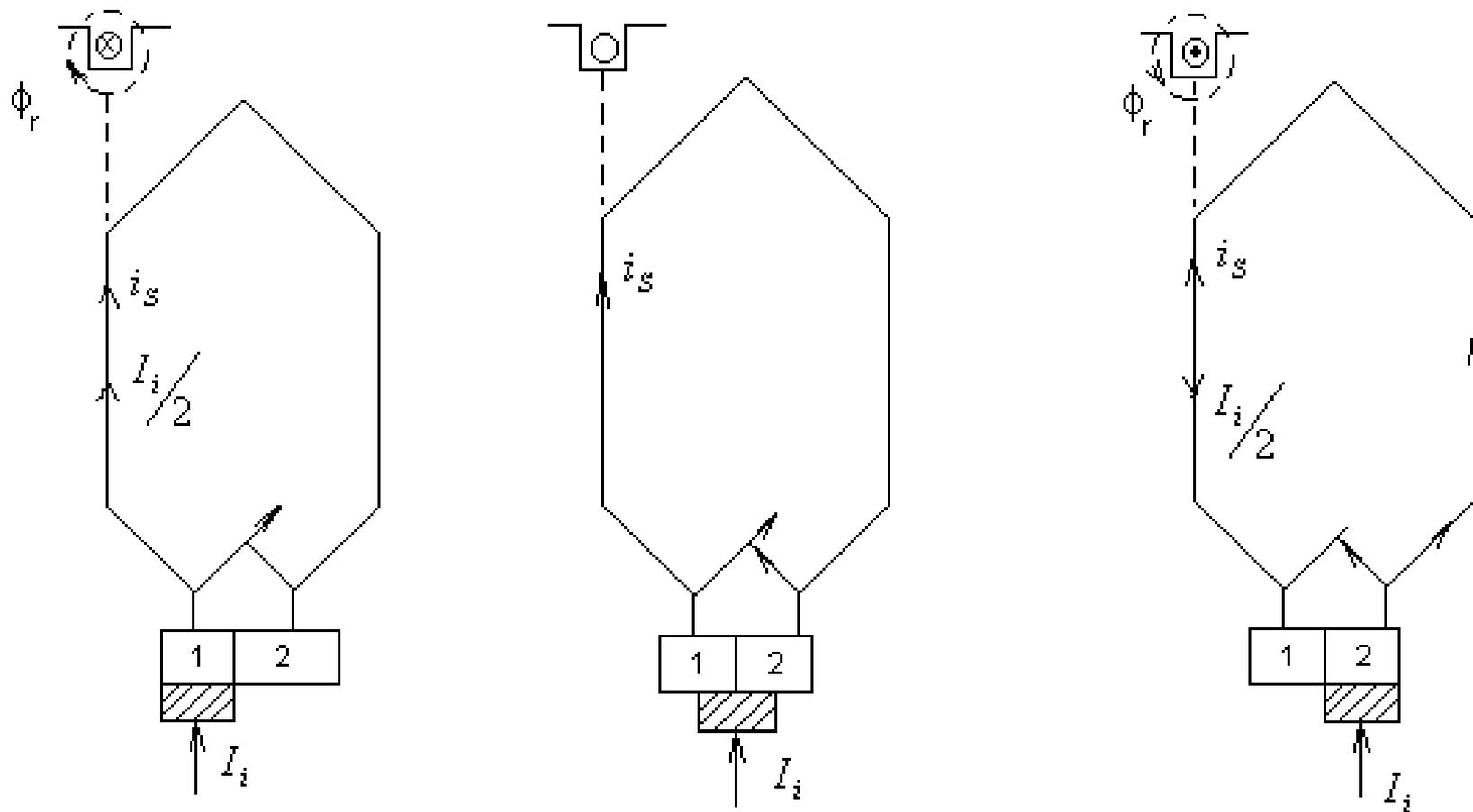


Figura 9

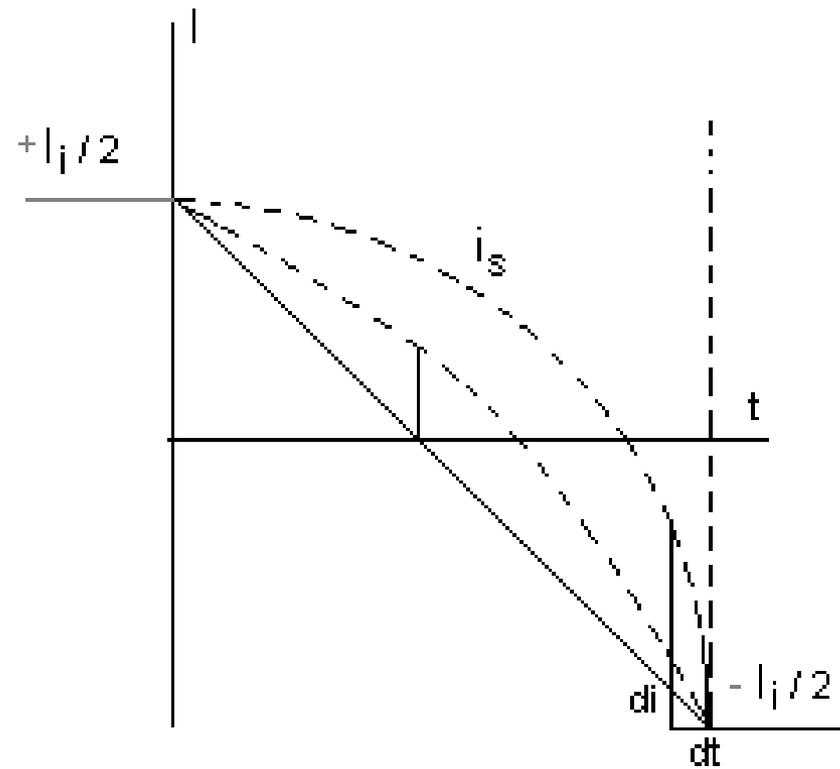
# Fenómeno de Conmutación



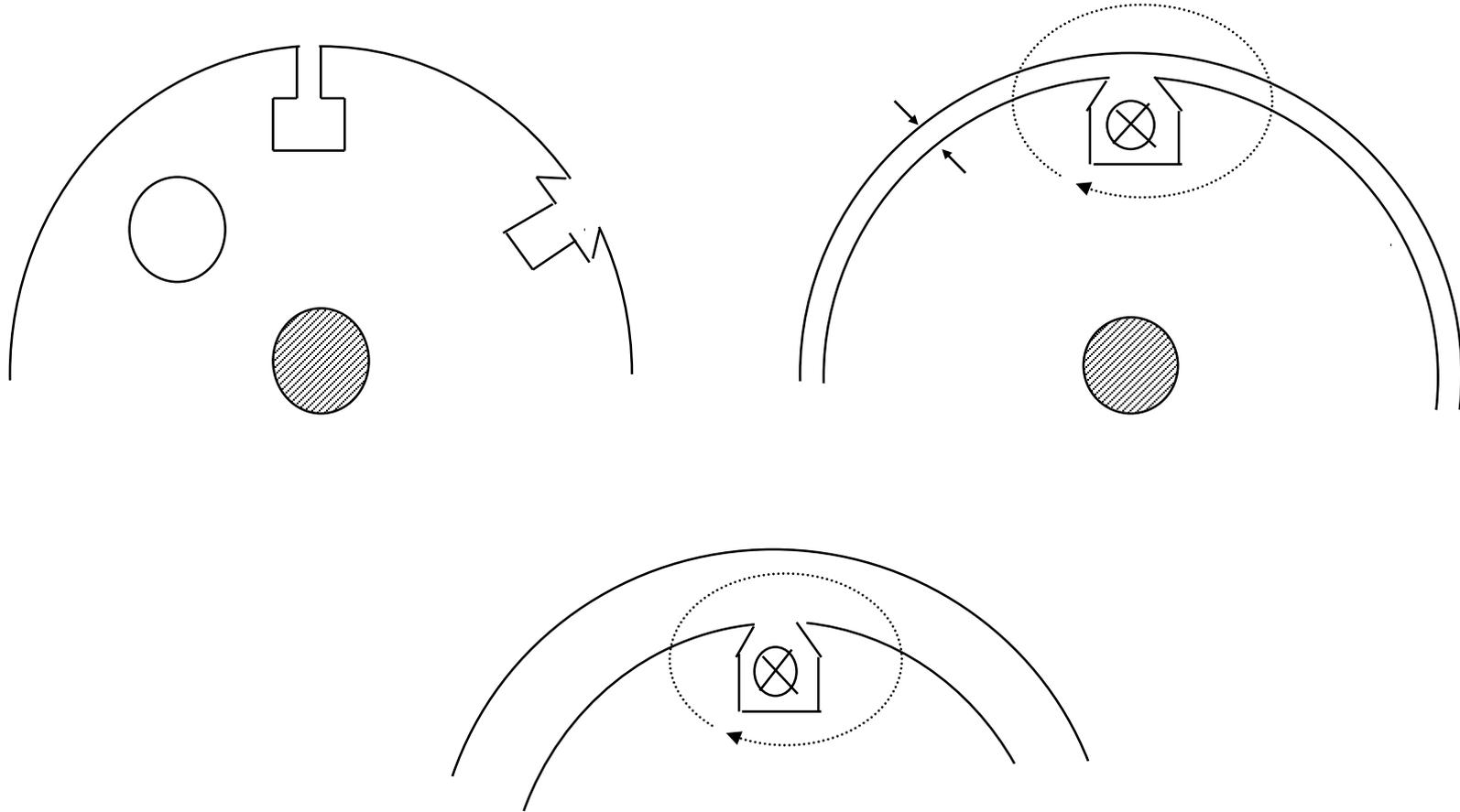
# Fenómeno de Conmutación



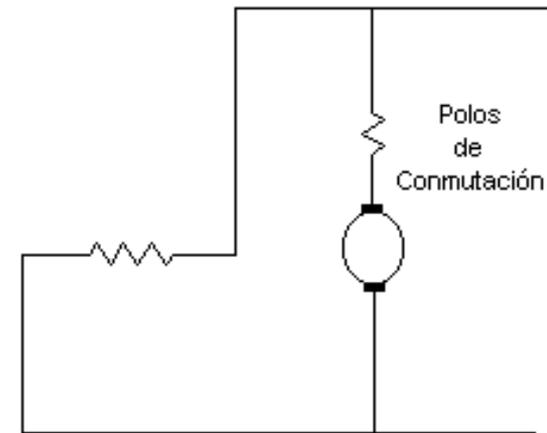
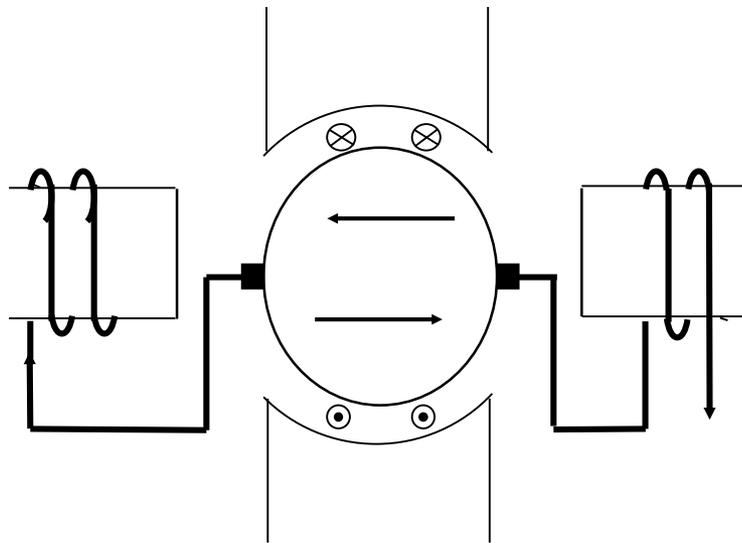
# Fenómeno de Conmutación



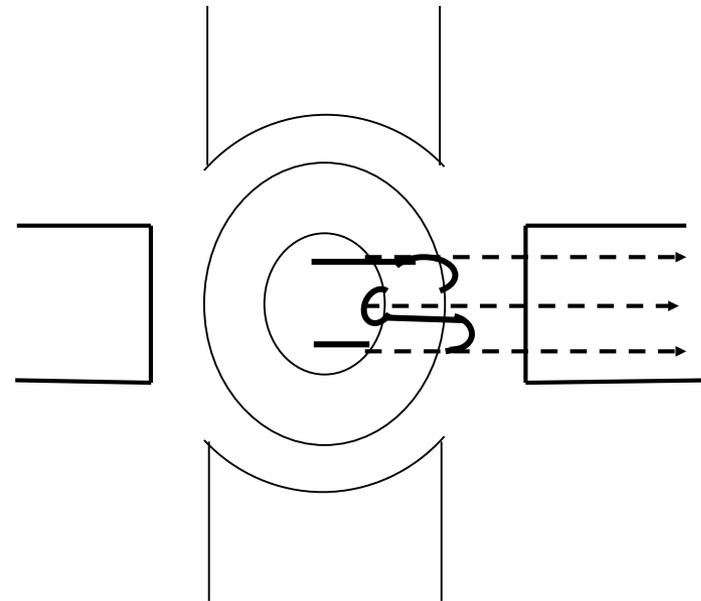
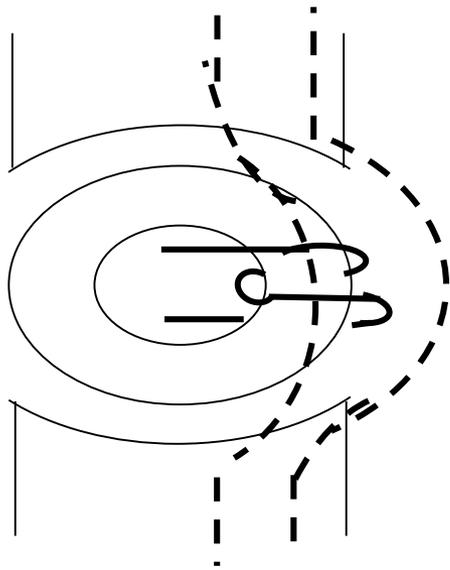
# Fenómeno de Conmutación



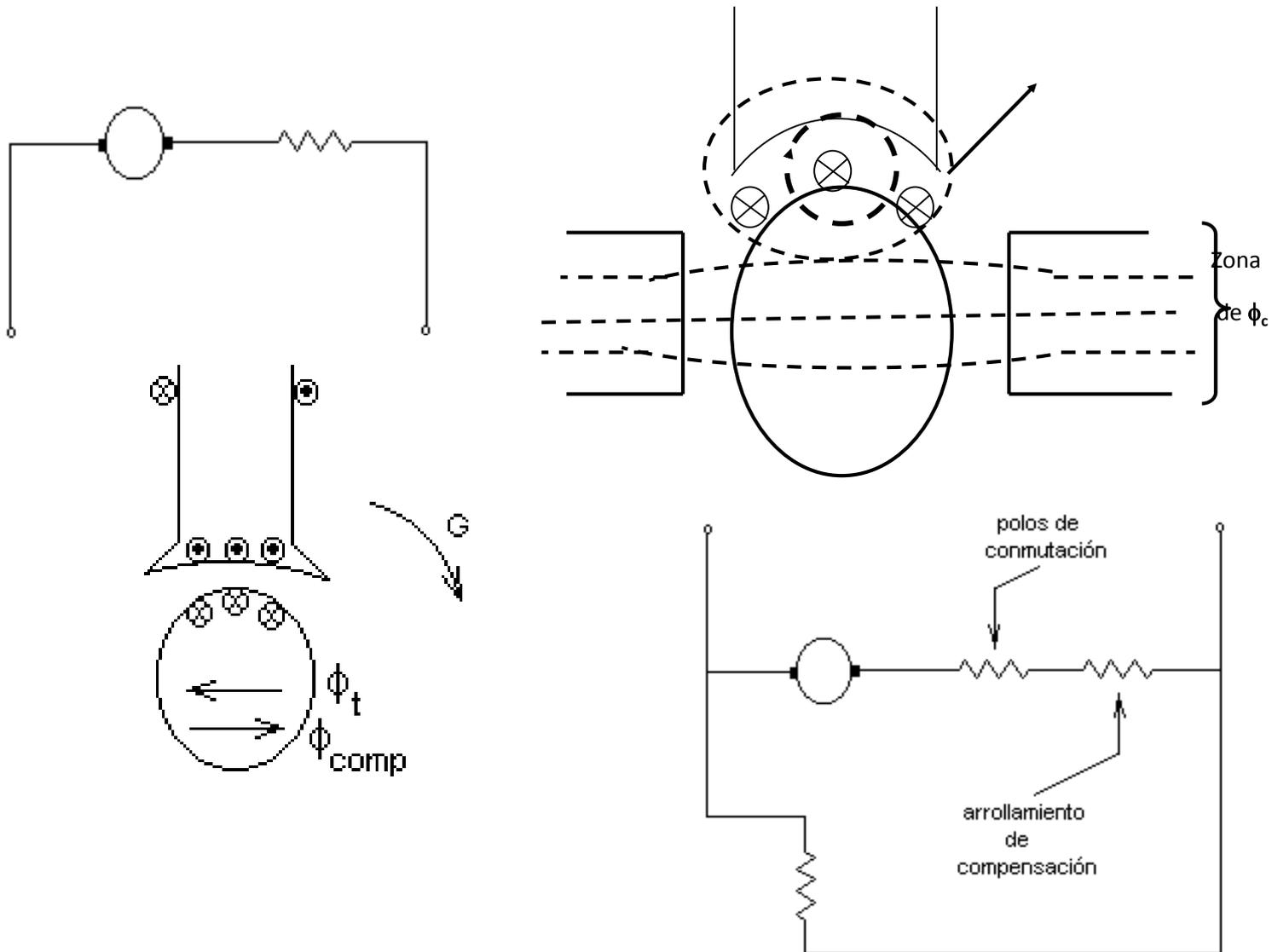
# Fenómeno de Conmutación



# Fenómeno de Conmutación



# Fenómeno de Conmutación



# Características de funcionamiento

- **Característica magnética:**  $\Phi = f(\theta)$ , relaciona las variaciones de flujo, en función de la fmm.
- **Características en vacío:**  $E = f(I_{ex})$  relaciona las variaciones de Fem. en función de la excitación.
- **Característica en carga:**  $U = f(I_{ex})$ , variación de tensión en función de corriente de excitación.
- **Característica externa:**  $U = f(I)$ , variación de la tensión en función de la corriente de carga.
- **Curva de regulación:**  $I_{ex} = f(I)$ , variación de la excitación en función de la corriente de carga.

# Generador excitación independiente

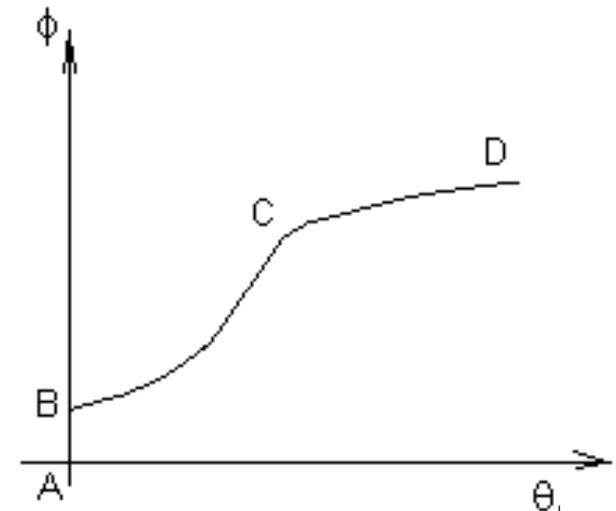
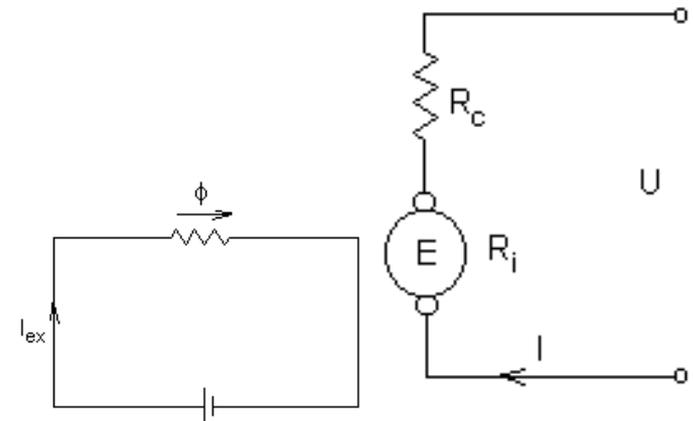
**Característica magnética**  $\Phi = f(\theta)$

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

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

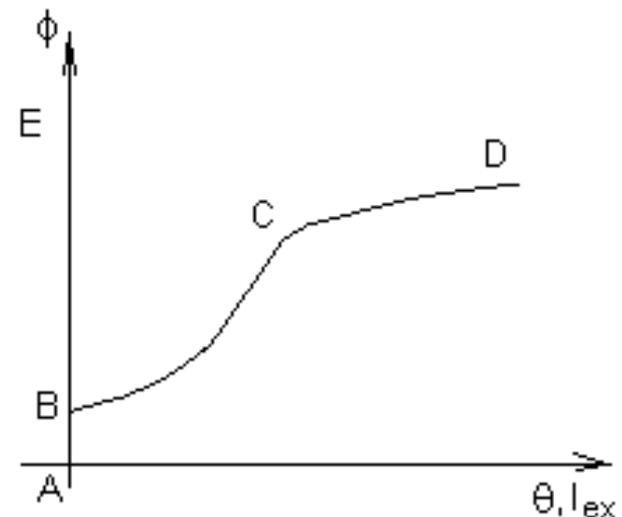
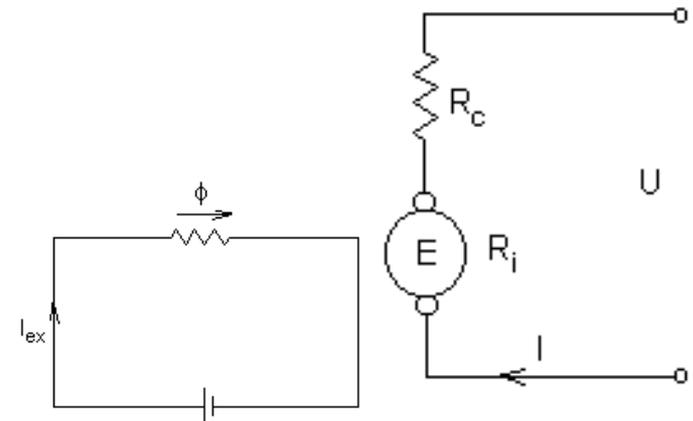
**Característica en vacío**  $E = f(I_{ex})$

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

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

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

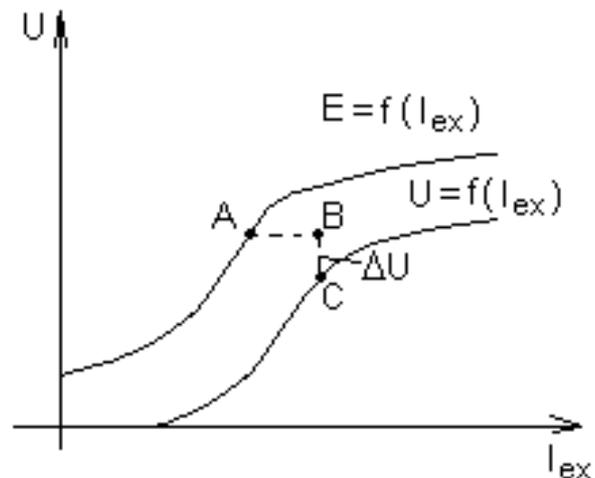
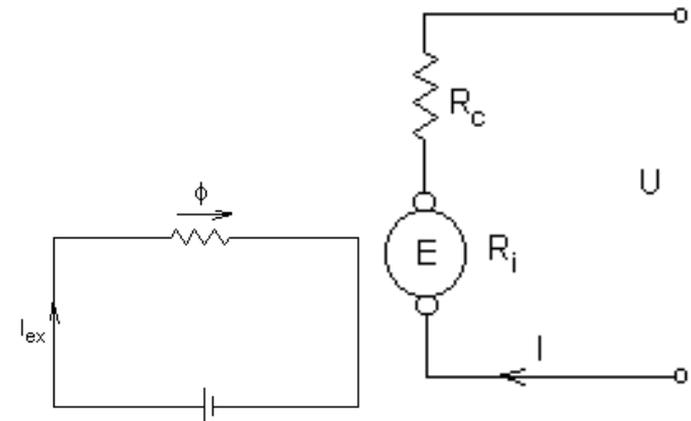
**Característica en carga**  $U = f(I_{ex})$

Elementos que ligan E con U:

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

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

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.



# Generador excitación independiente

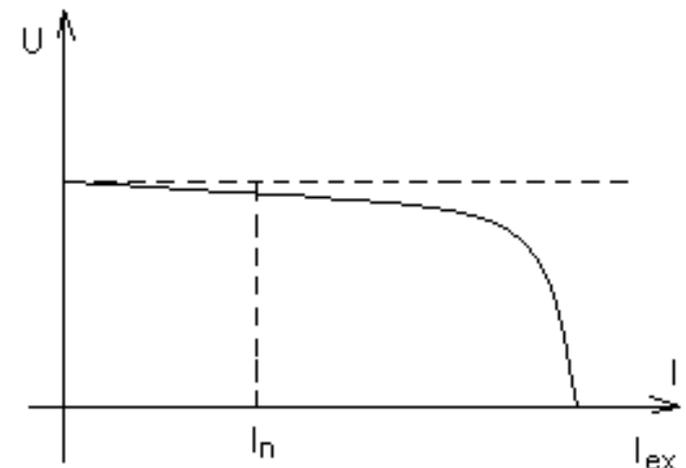
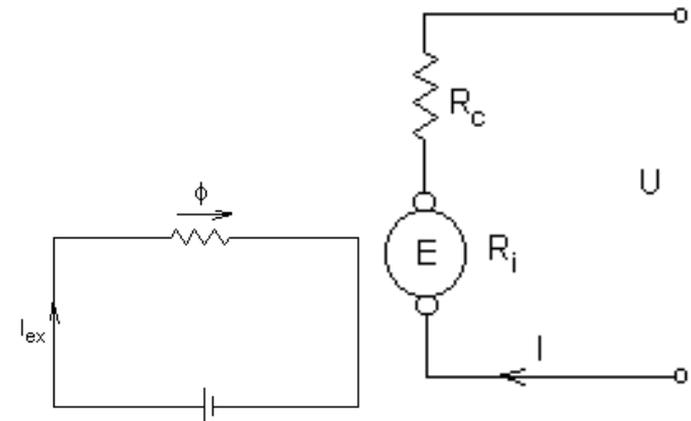
## Característica externa $U = f(I)$

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

➤ **Máquina real:** la reacción de inducido y a 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 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.

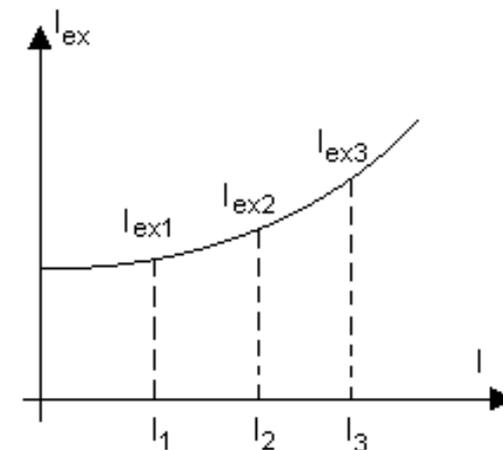
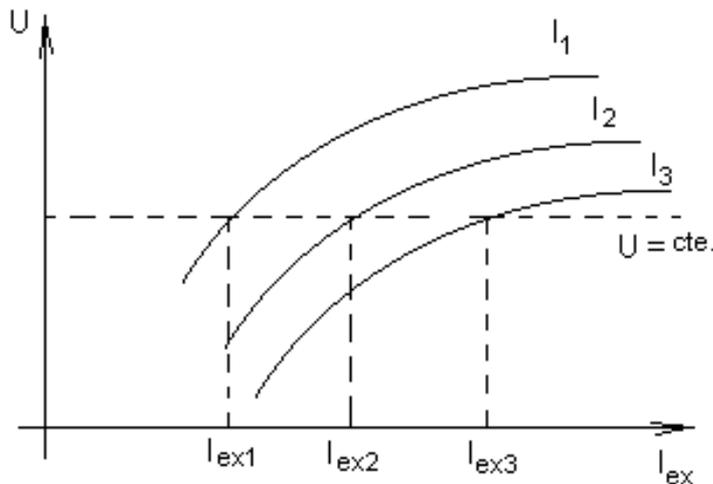
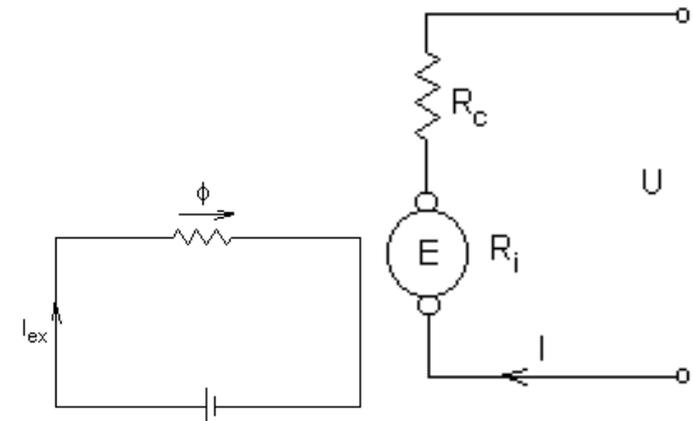


# Generador excitación independiente

## 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 TENSION:

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

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

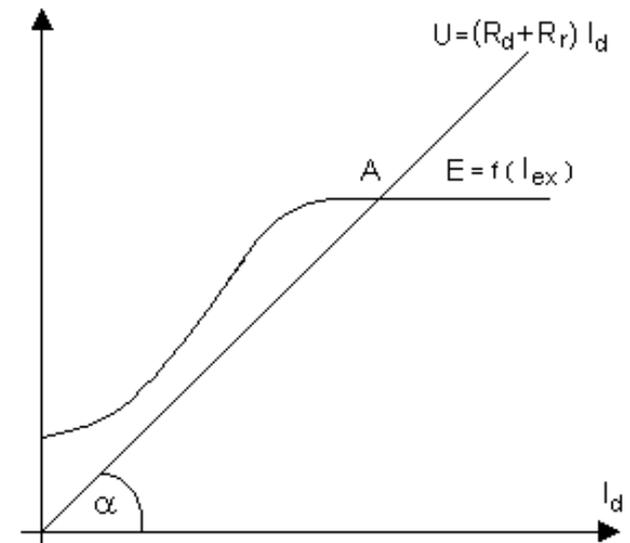
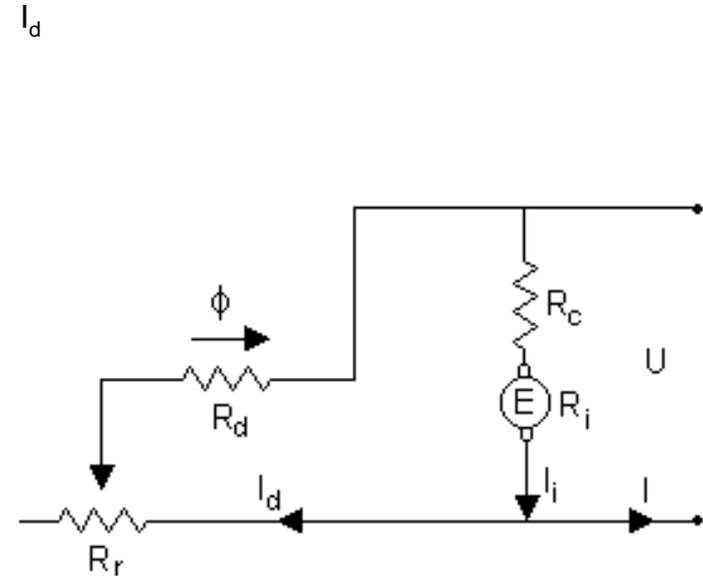
- La corriente de excitación  $I_d$  aumentará cuando:

f.e.m. del  
inducido



tensión del  
circuito derivación

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



# Generador derivación

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

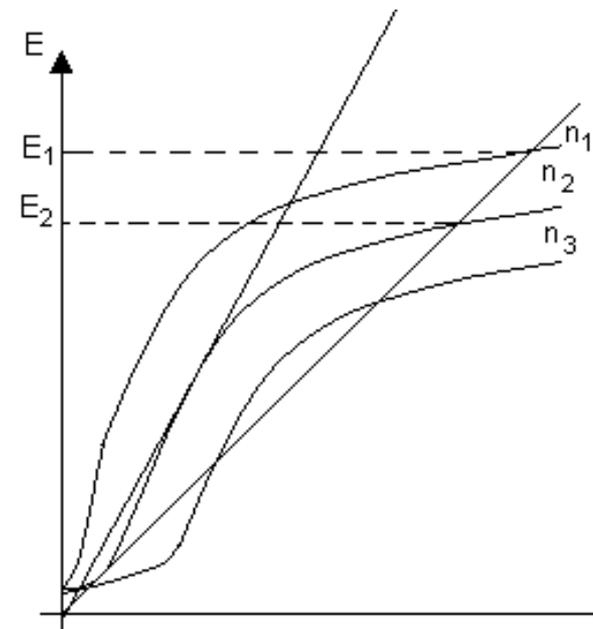
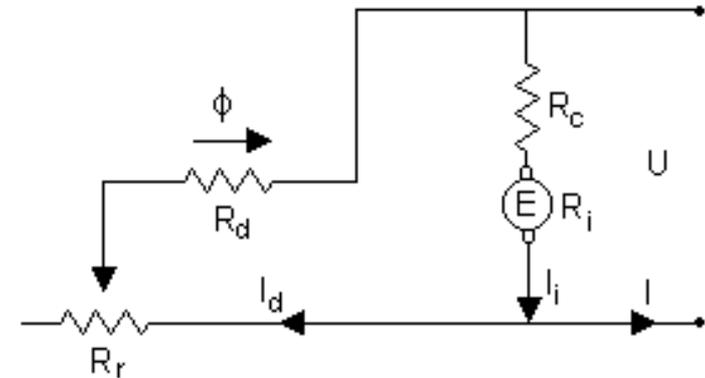
## Conclusiones

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.



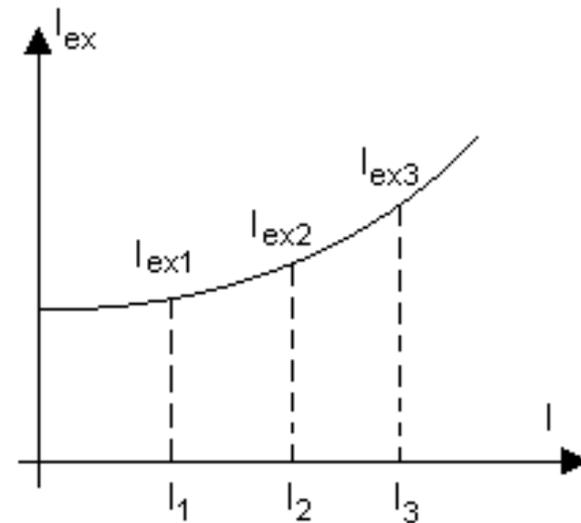
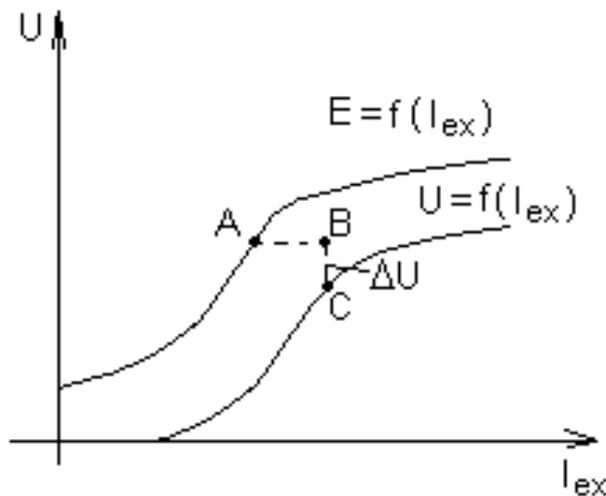
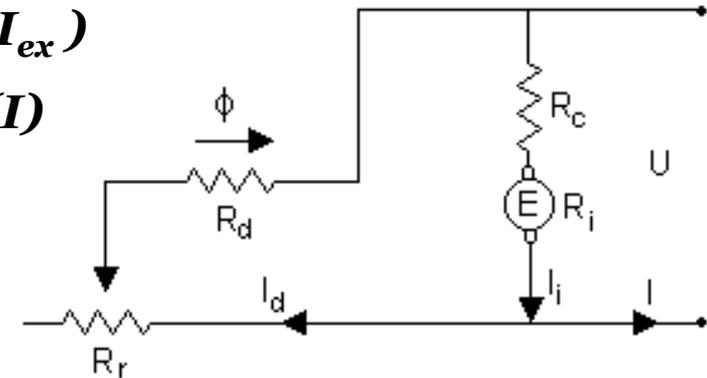
# Generador derivación

**Característica carga y regulación**  $U = f(I_{ex})$

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

Prácticamente iguales a las de excitación independiente.

La tensión en el circuito de excitación proviene de los bornes de la máquina, la que puede sufrir variaciones.



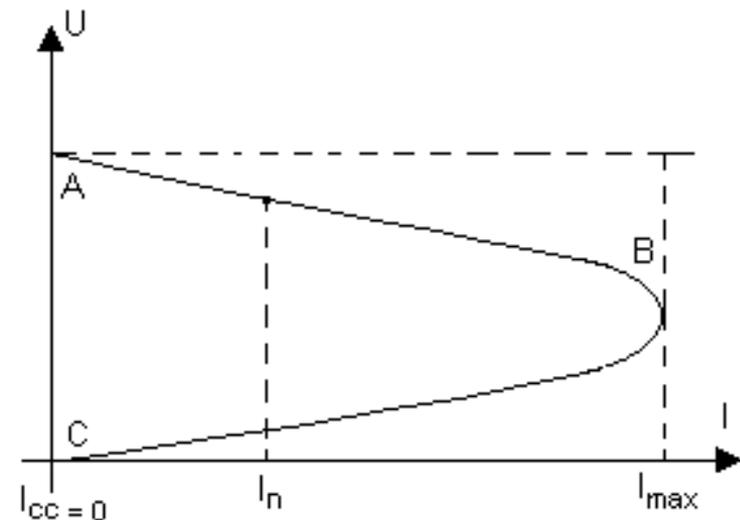
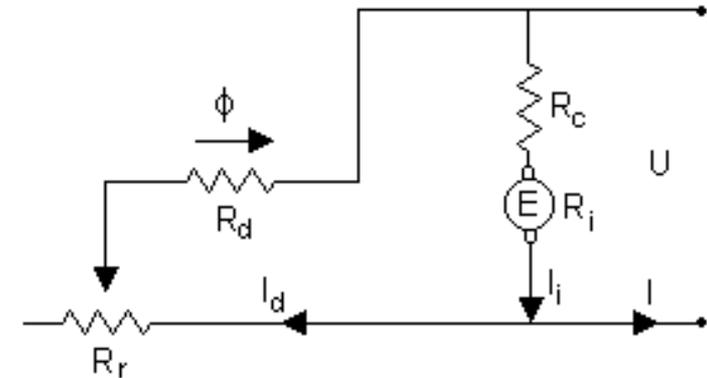
# Generador derivación

## Característica externa $U = f(I)$

**Máquina real:** dado que está alimentada por la tensión de bornes ( tramo A - B ):

- presenta una disminución más rápida que la de excitación independiente, porque la  $I_d = cte.$
- para cargas elevadas, se llega al cortocircuito en el cual  $U = 0$ , se anula  $I_d$  y se hace  $I = 0$ .

- 1) Estas máquinas soportan cortocircuitos sin deteriorarse.
- 2) Esto explica porqué un cortocircuito exterior a la máquina, hace que la misma no genere.



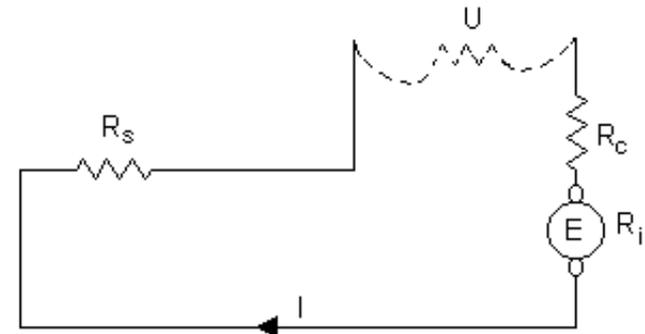
# Generador serie

## Características magnéticas y en vacío

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

$$I = I_s$$

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



# Generador serie

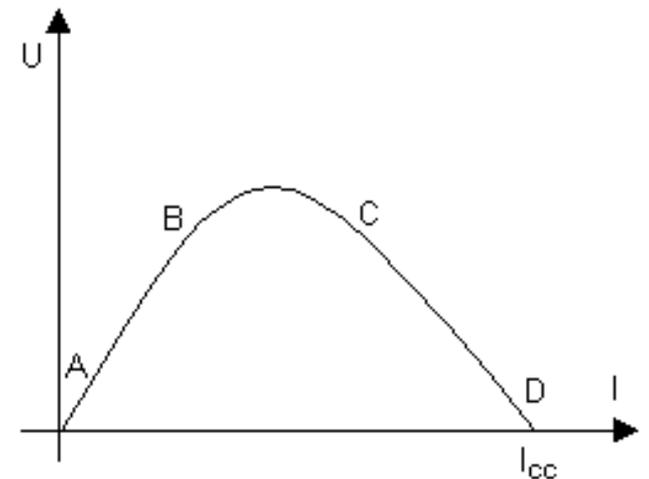
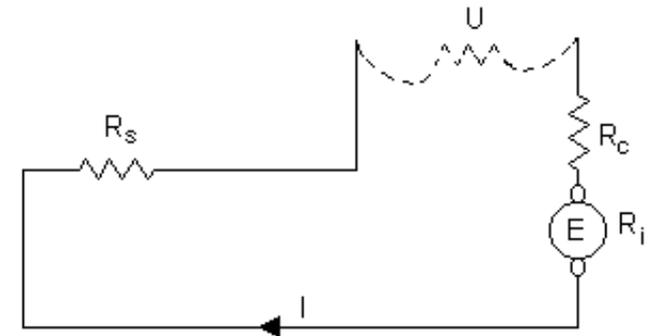
**Característica en carga o externa**  $U = f(I_s) = f(I)$

- **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.**



# Generador compuesto

## Característica magnética y en vacío

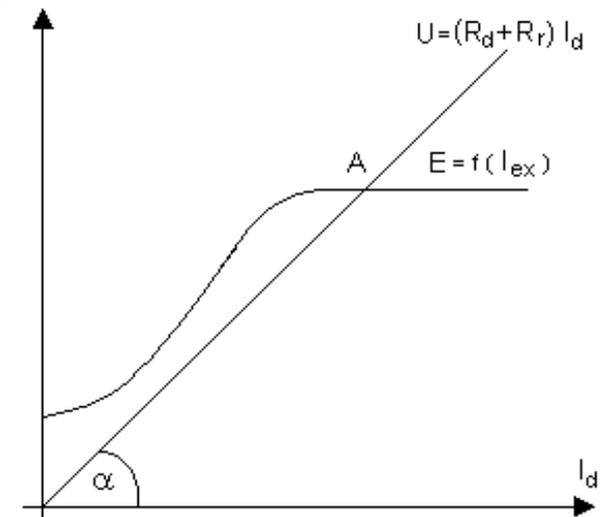
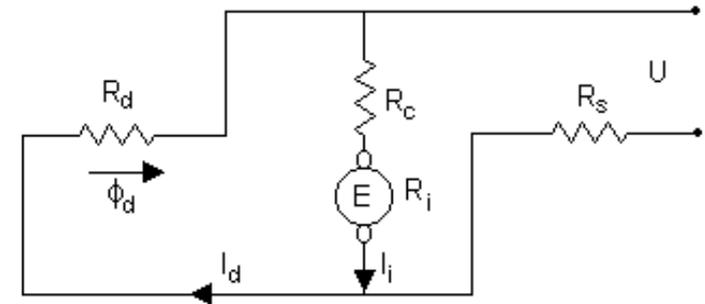
Dos arrollamientos en los polos ppales, el derivación  $R_d$  y el serie  $R_s$ .

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

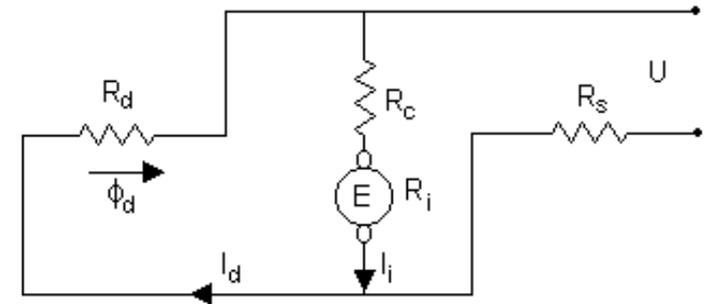
Característica:

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

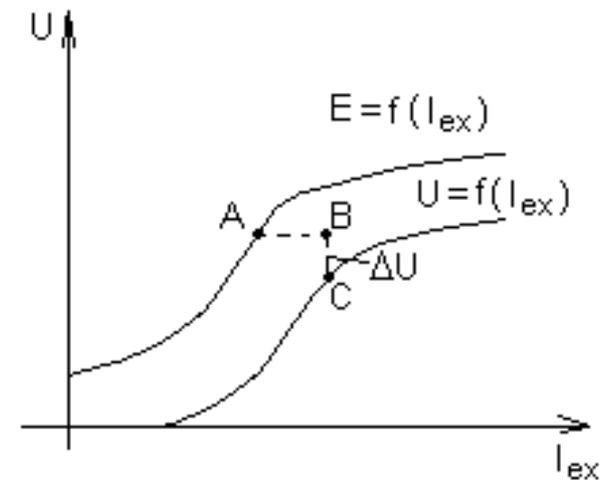


# Generador compuesto

**Característica en carga**  $U = f(I_{ex})$



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



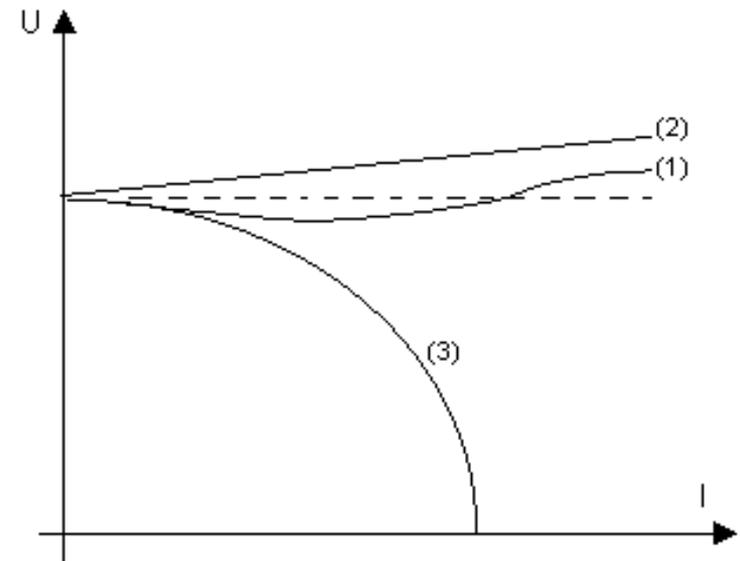
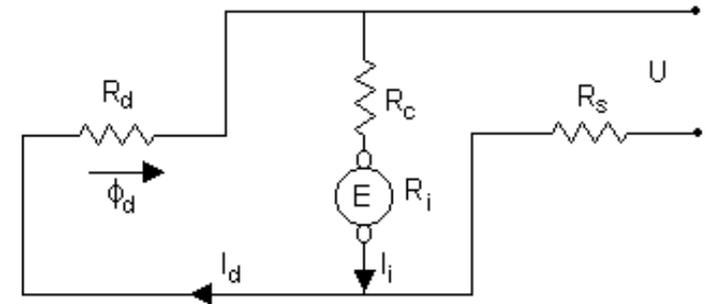
# Generador compuesto

**Características externas**  $U = f(I)$

**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

## Ecuación de la velocidad

$$E = \frac{\phi.n.N.p}{60.a} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} U &= E + RI \\ I &= \frac{U - E}{R} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad n = \frac{60.a}{\phi.N.p} \cdot (U - R.I)$$

- Para variar la velocidad, se puede actuar sobre la tensión  $U$ , flujo  $\Phi$ , o caídas internas  $R.I$
- 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".

# Parámetros

## Corriente de arranque

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

$$I_{Arr} = \frac{U}{R} \quad ; \quad E = 0 \quad (\text{corriente absorbida grande, momento del arranque})$$

- Reducción por resistencias de arranque  $R_A$ :

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

# Parámetros

## Ecuación del Momento resistente y de rotación

En forma general:  $M = F.r$

Fuerza en los N conductores del inducido:

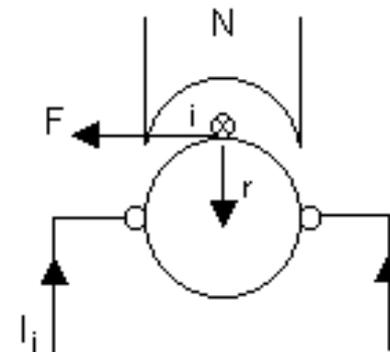
$$F = N.l.i.B$$

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: 
$$M = \frac{p.N}{2.\pi.a} . \phi . I_i$$

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



# 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 ( $R_A I_i^2$ ).

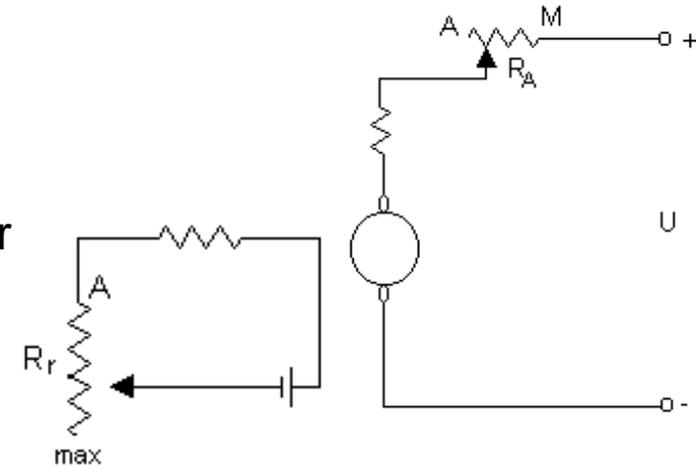
## Velocidad

Se regula:

- Variando la tensión  $U$  (motores pequeños).
- Variando la excitación  $\Phi$  con resistencia de regulación  $R_r$ .
- 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. La detención es muy brusca.

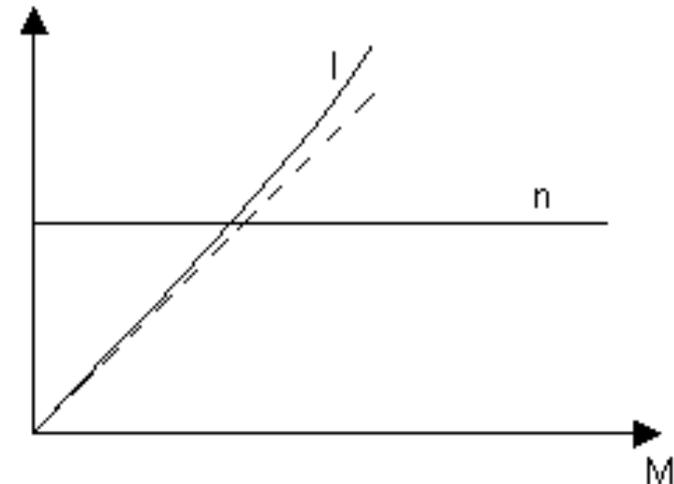
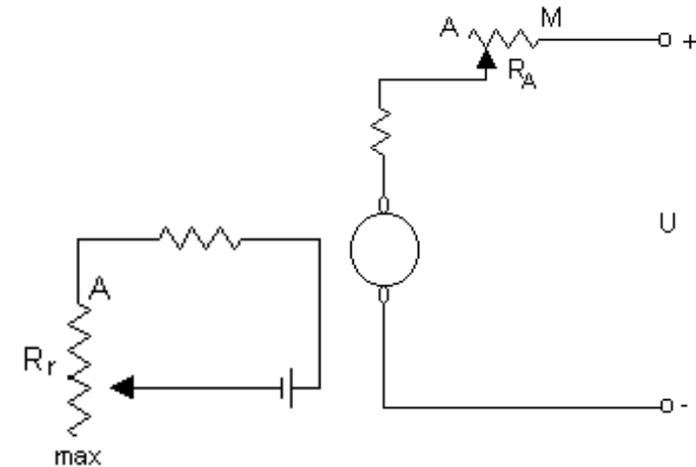
## Curvas características

$$n = f(M), \phi = \text{cte};$$

la velocidad es independiente del par. Las caídas  $Ri$  son pequeñas. Es un motor de velocidad muy constante.

$$I = f(M);$$

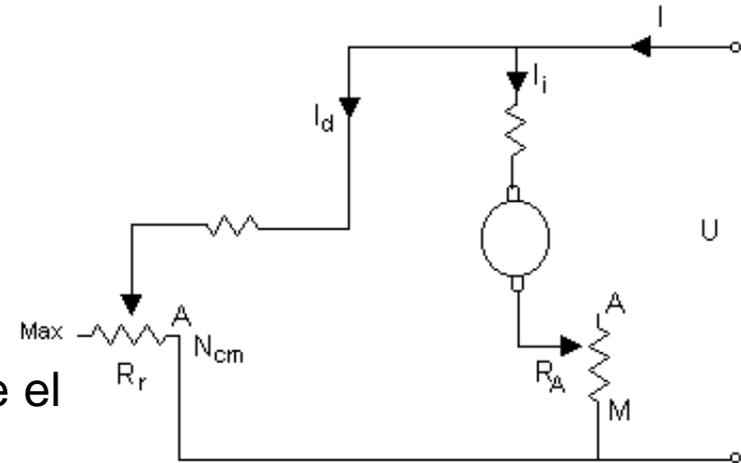
La  $I$  crece proporcionalmente a  $M$ , no es rectilínea por reacción de inducido.



# 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

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

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

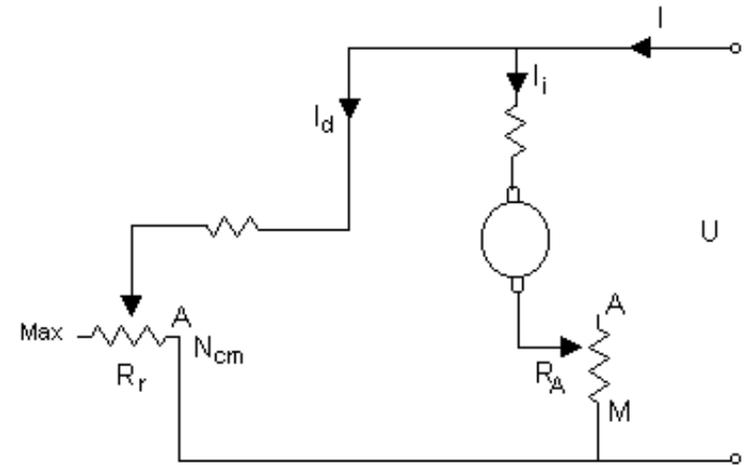


- cuando disminuye  $U$ ,
- disminuye  $I_d$ ,
- disminuye el flujo,
- aumenta la velocidad.

# Motor derivación

## Inversión de marcha

- Si se invierte la polaridad de los bornes, continúa girando en el mismo sentido.
- Se deben invertir entre si la excitación y el inducido, con la misma polaridad de bornes.



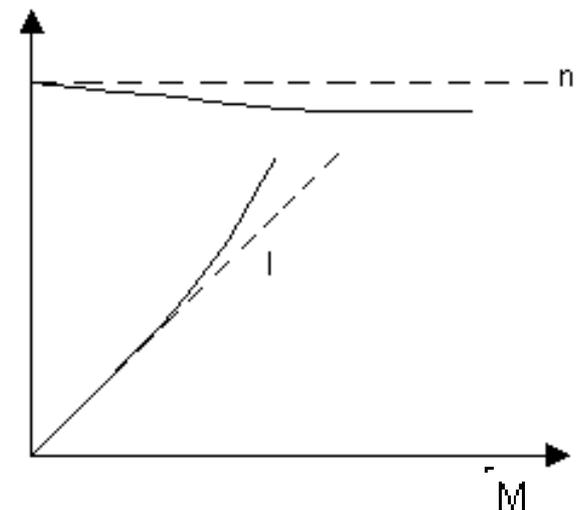
## Frenado

1. Por disipación de energía.
2. Por contracorriente. La detención es muy brusca.

## Curvas características



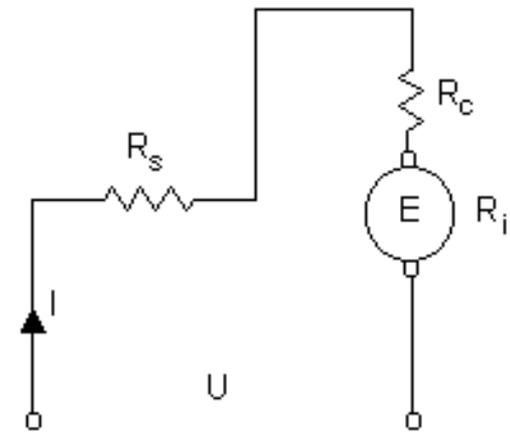
- $n = f(M)$ :  $n$  varía poco con el par, debido a la  $R_i$  pequeña.
- $I = f(M)$ : la corriente crece con el par  $M = \phi \cdot I$



# Motor serie

## Arranque

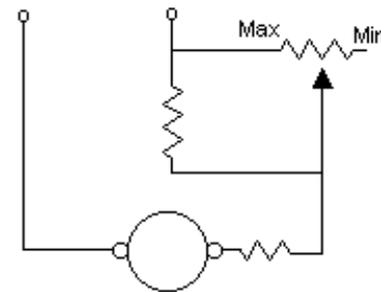
- De necesitarse arranque con corriente reducida, la  $R_A$  va en serie con el motor.
- Considerar la reducción de par que trae aparejada.



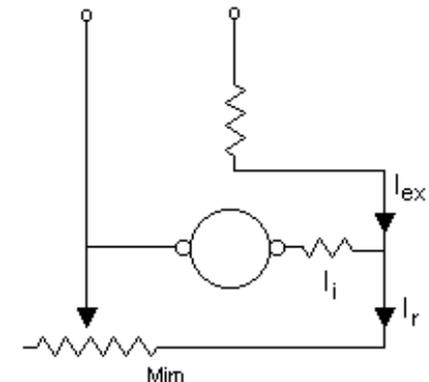
## Velocidad

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

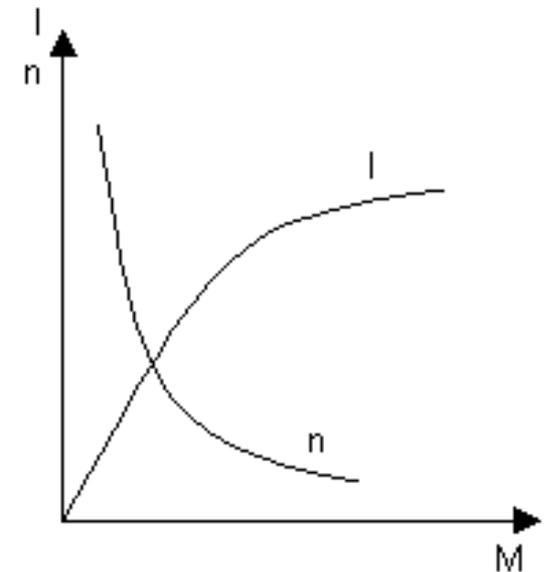
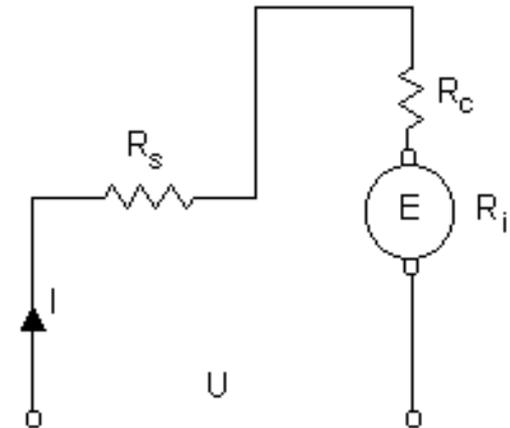
- $n = f(M)$ 
  - aumenta el par  $M$ ,
  - aumenta la corriente absorbida  $I$
  - aumenta el flujo  $\phi$ ,
  - disminuye la velocidad  $n$ , según una hipérbola.

$$n = f\left(\frac{1}{\phi}\right) = f\left(\frac{1}{M}\right)$$

- $I = f(M)$

$M = \phi \cdot I$  ➡ La curva es una parábola.

Gran par a baja velocidad, ideal en el arranque.



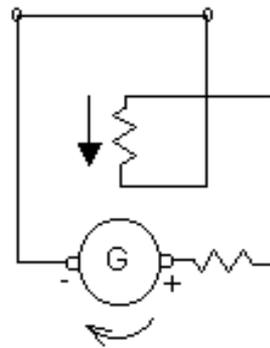
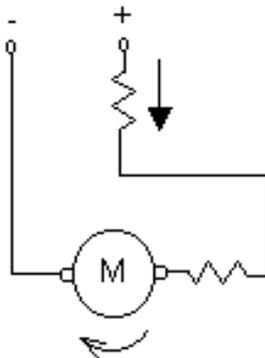
# Motor serie

## Inversión de marcha

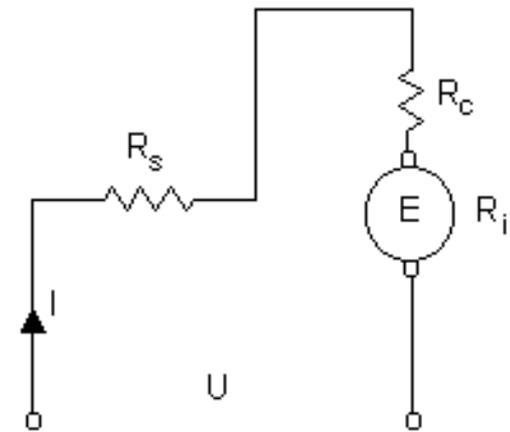
- Idem anterior.
- Al invertir la polaridad de los bornes gira en igual sentido. Motor universal.

## Frenado

- Idem derivación.



Frenado como  
generador en igual  
sentido  
(vehículo)



# Motor compuesto

## Arranque, par y velocidad

Idem casos anteriores.

Idem casos anteriores.

## Inversión de marcha y frenado

## 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.

