



fcfm

Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



EL 6000

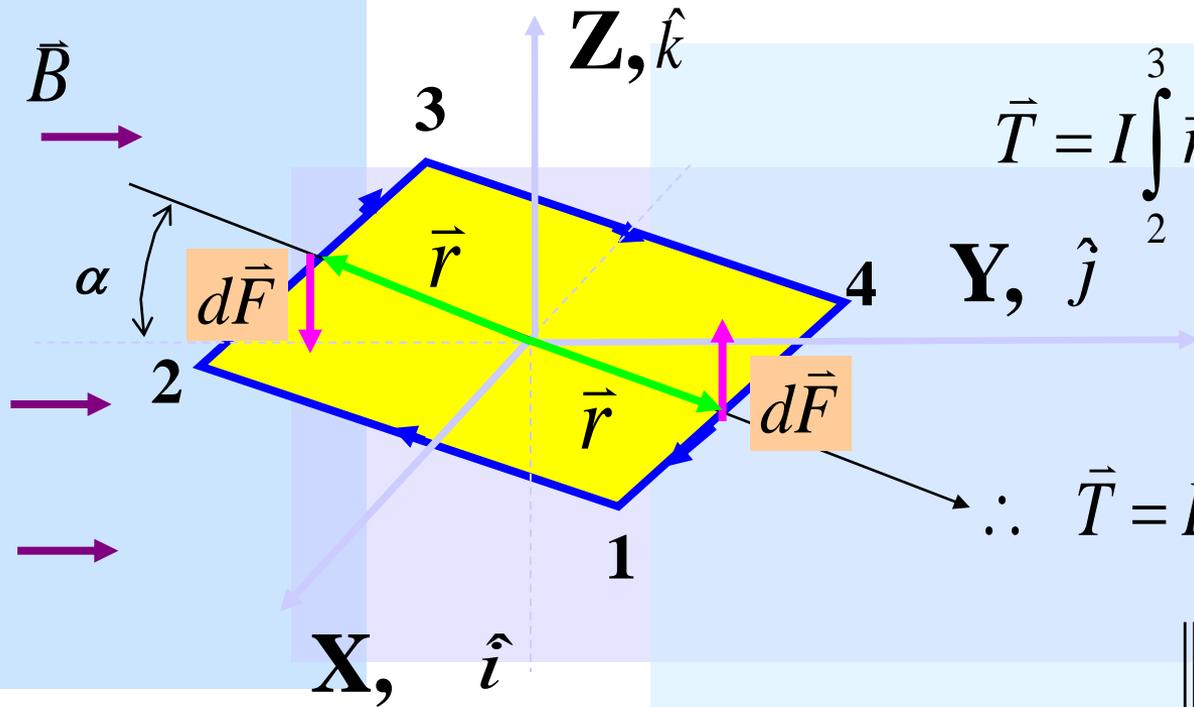
Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables

Clase 4: PRINCIPIOS BASICOS DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Luis Vargas
AREA DE ENERGIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA



Principio del motor



$$\vec{T} = I \int_2^3 \vec{r} \times dx \hat{i} \times \vec{B} + I \int_4^1 \vec{r} \times dx \hat{i} \times \vec{B}$$

Torque neto sobre el circuito

$$\therefore \vec{T} = Iwl B \cos \alpha \hat{i} = I\phi \cos \alpha \hat{i}$$

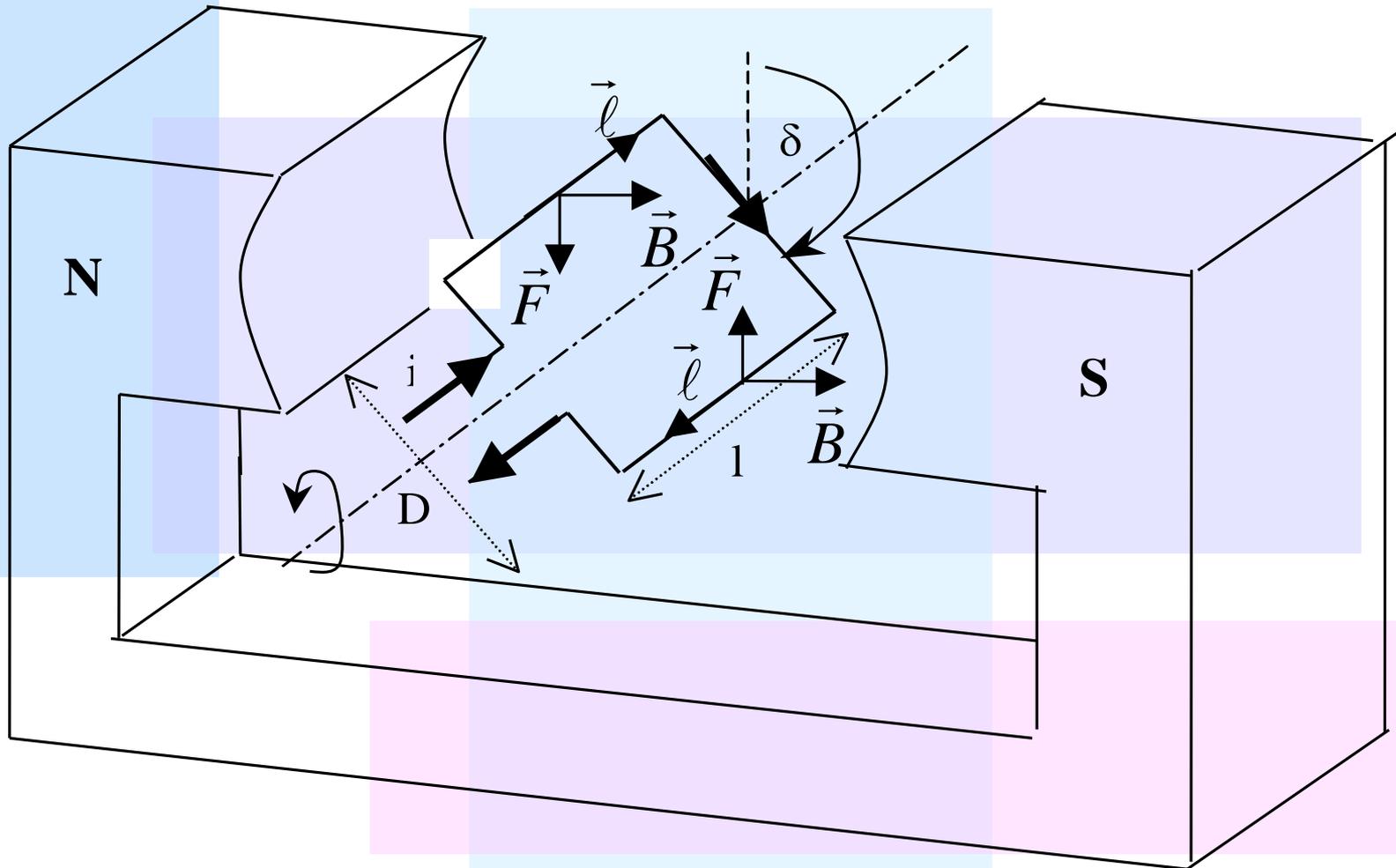
$$\|\vec{T}\| \propto \phi \times I$$

OJO, para que exista torque se debe proveer:

- Corriente en espira **I**
- Campo magnético **B**

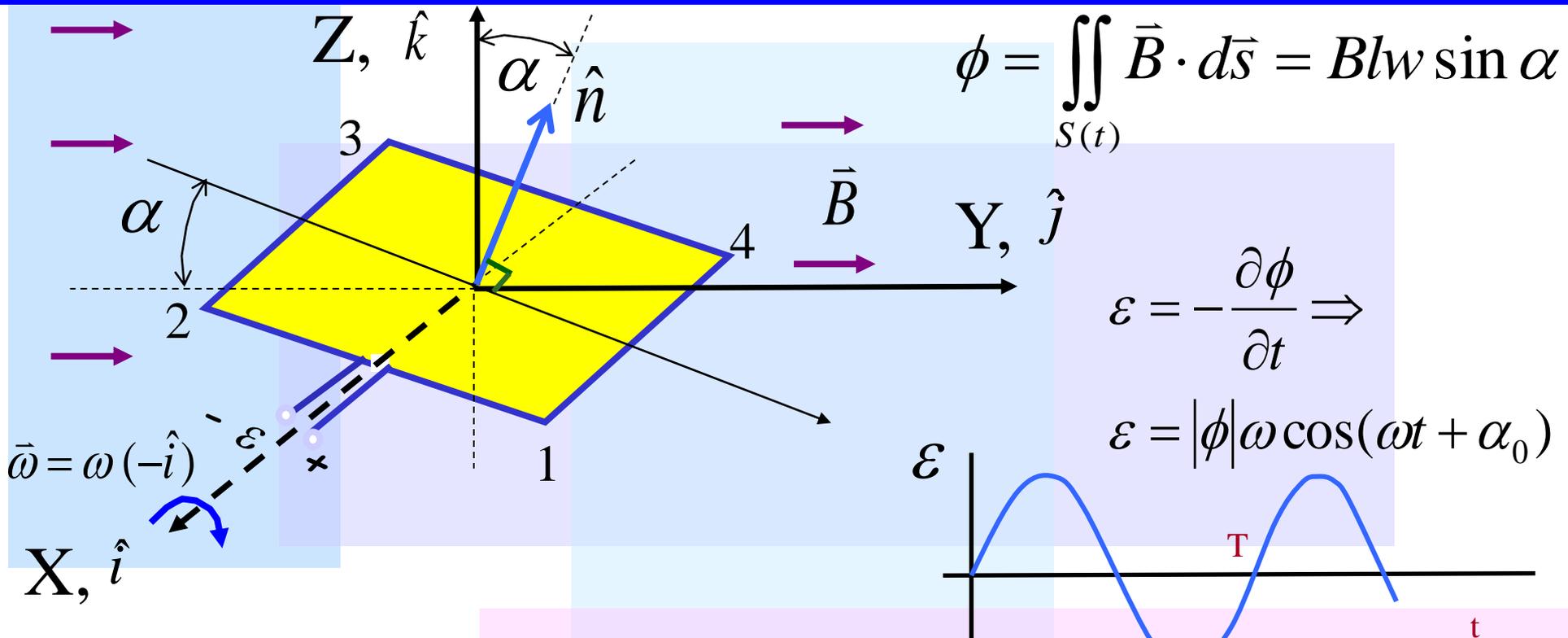


Motor elemental





Principio del generador



OJO, para que exista fem se requiere:

- Velocidad angular $\vec{\omega} = \omega(-\hat{i})$
- Campo magnético \vec{B}



PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

□ GENERADOR DE C.C. O DÍNAMO

El voltaje inducido en la espira:

$$e = - \left(\frac{d\phi}{dt} \right)$$

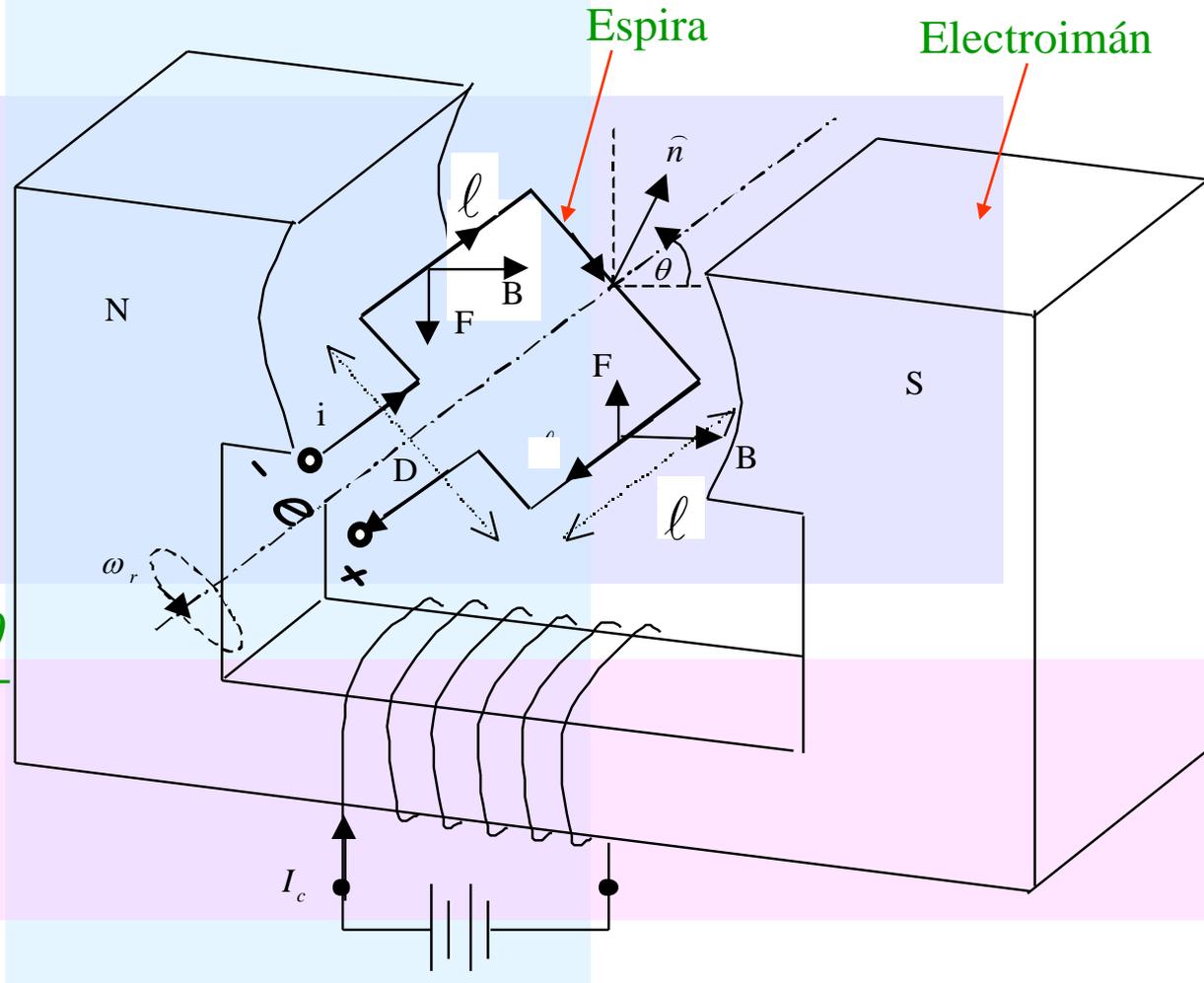
Se cumple

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$= B \cdot D \cdot \ell \cdot \cos(\theta)$$

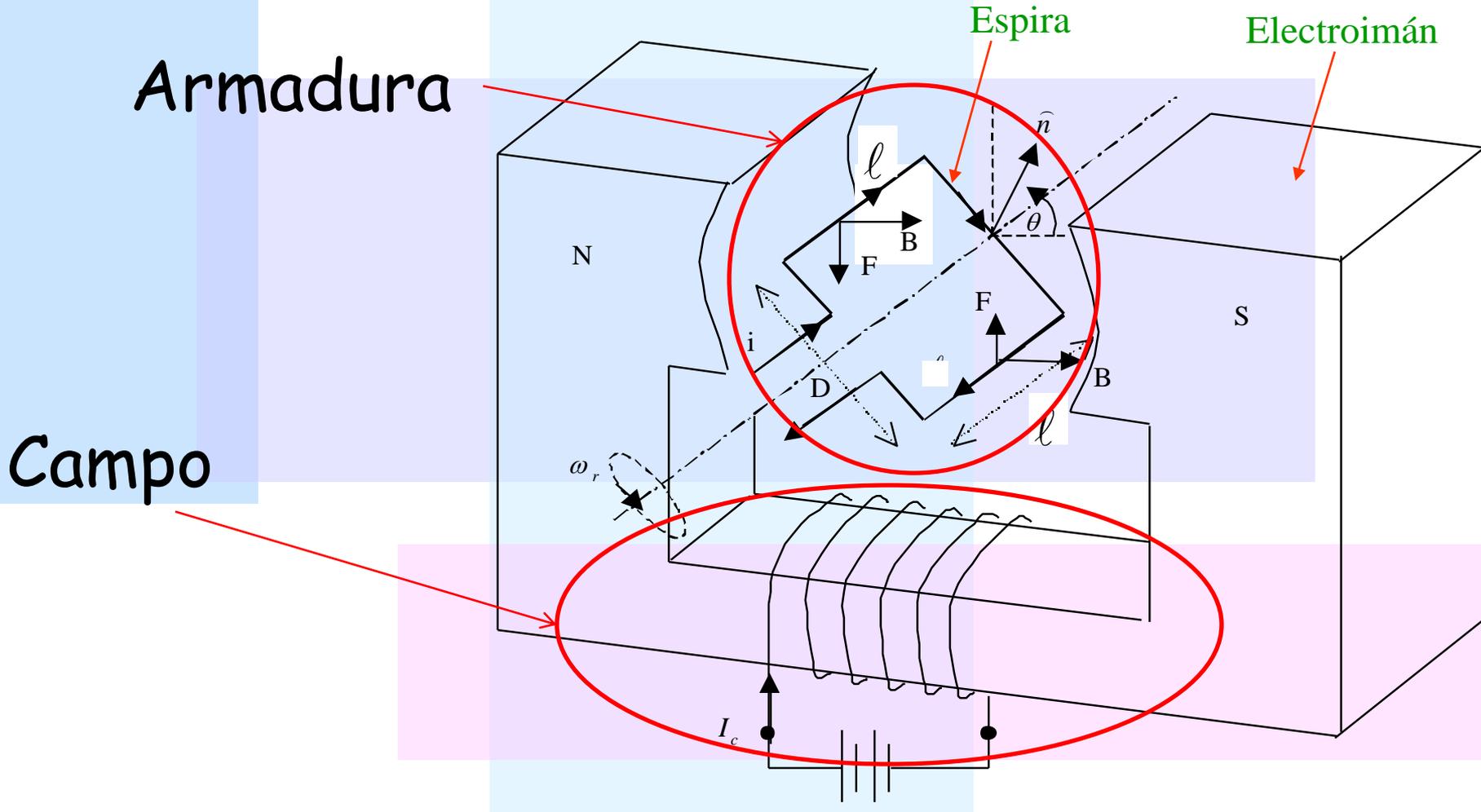
$$\Rightarrow e = B \cdot D \cdot \ell \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$e = K \times \omega \times \phi$$





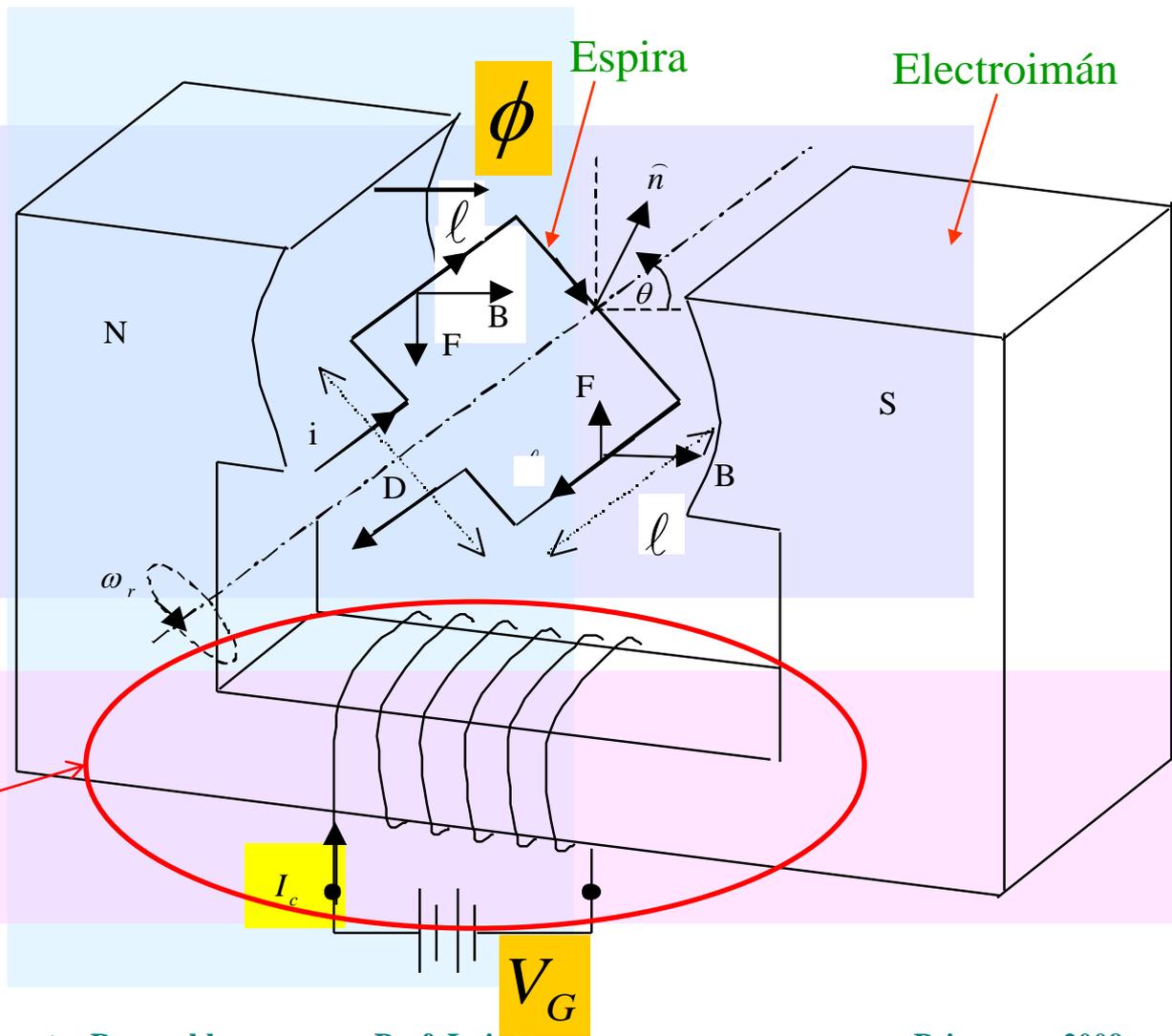
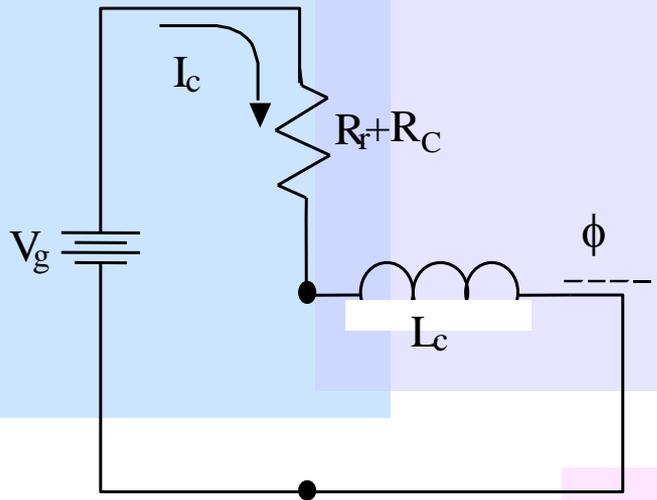
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO





PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Circuito equivalente



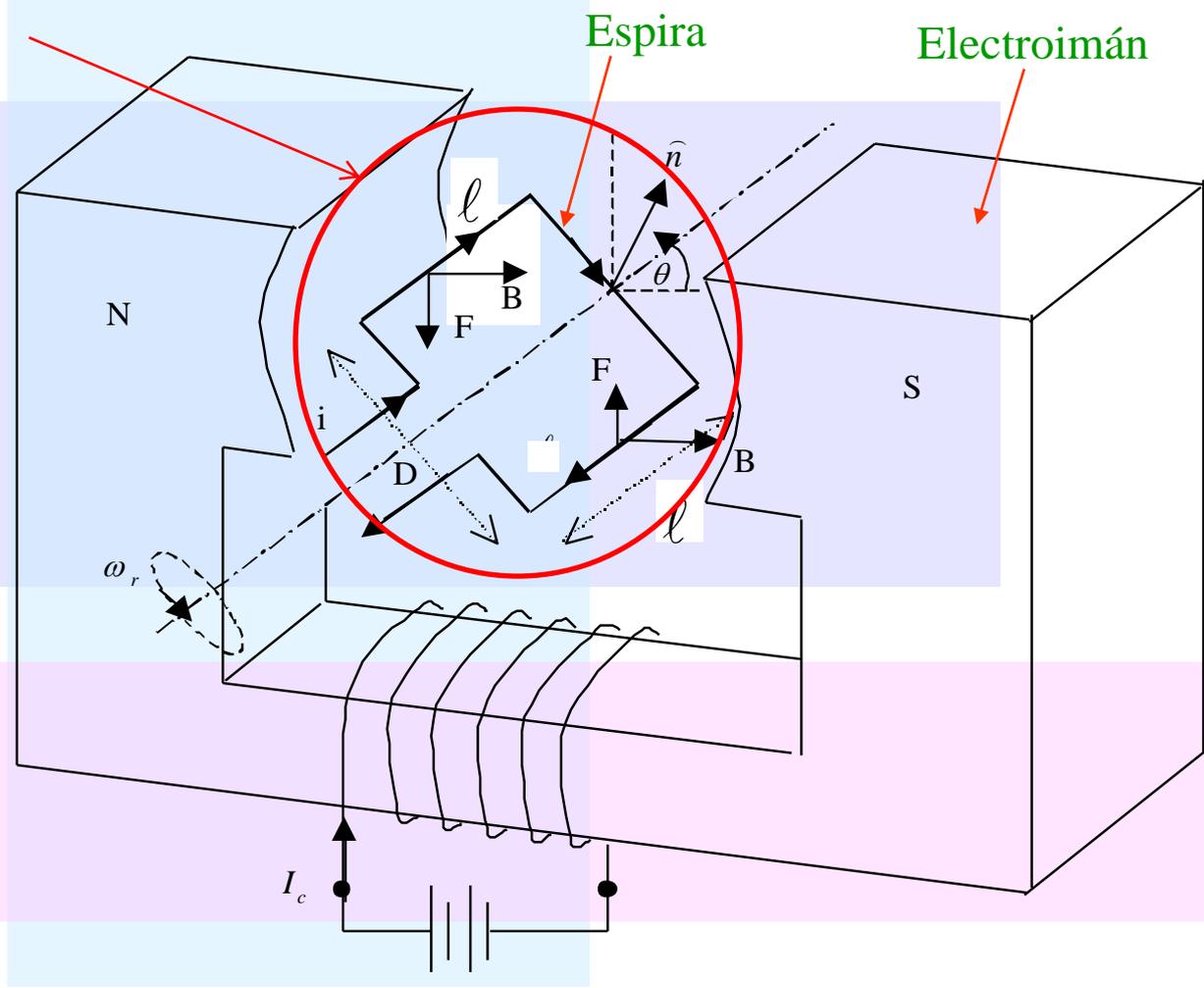
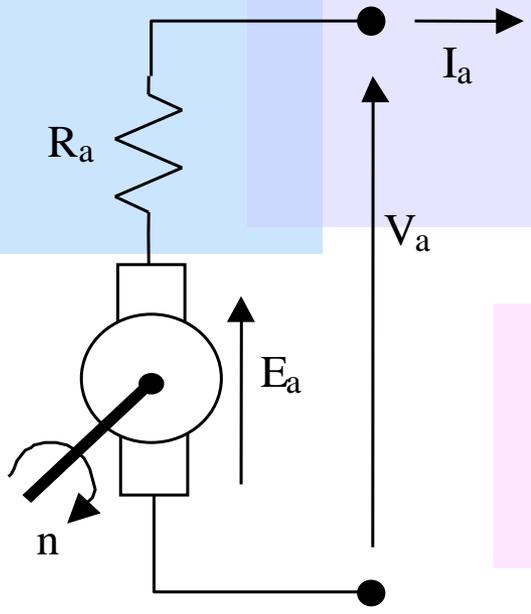
Campo



PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

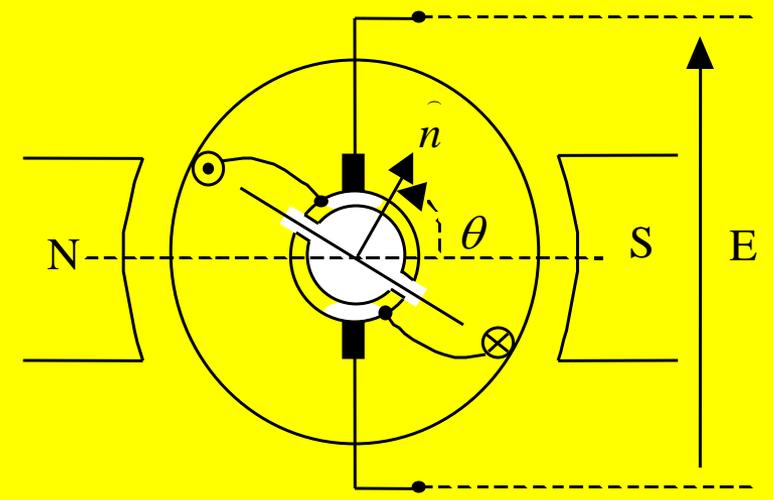
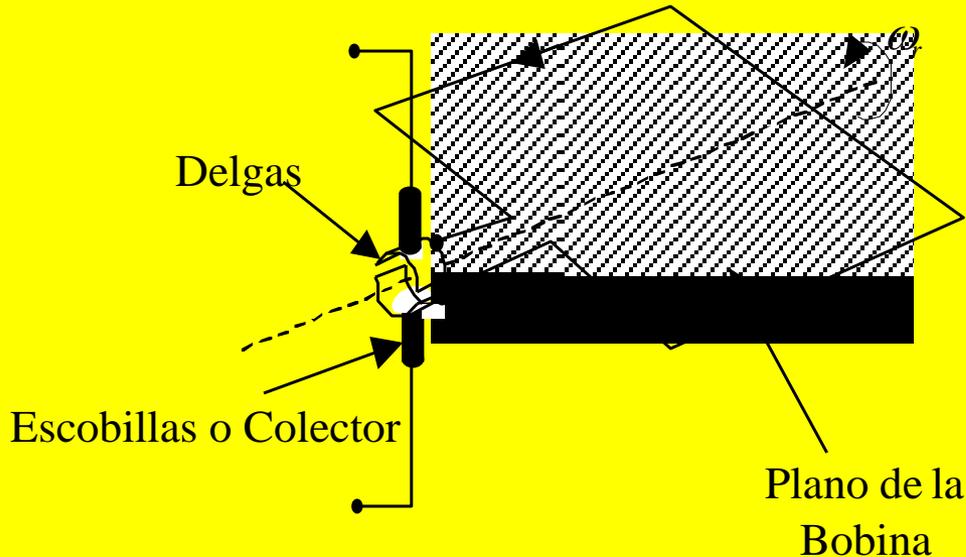
Armadura

Circuito equivalente

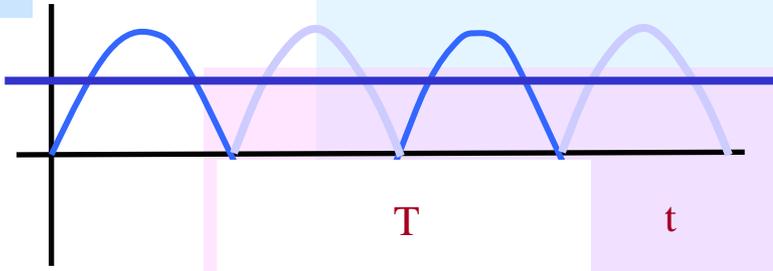




Principio del generador de Corriente Continua



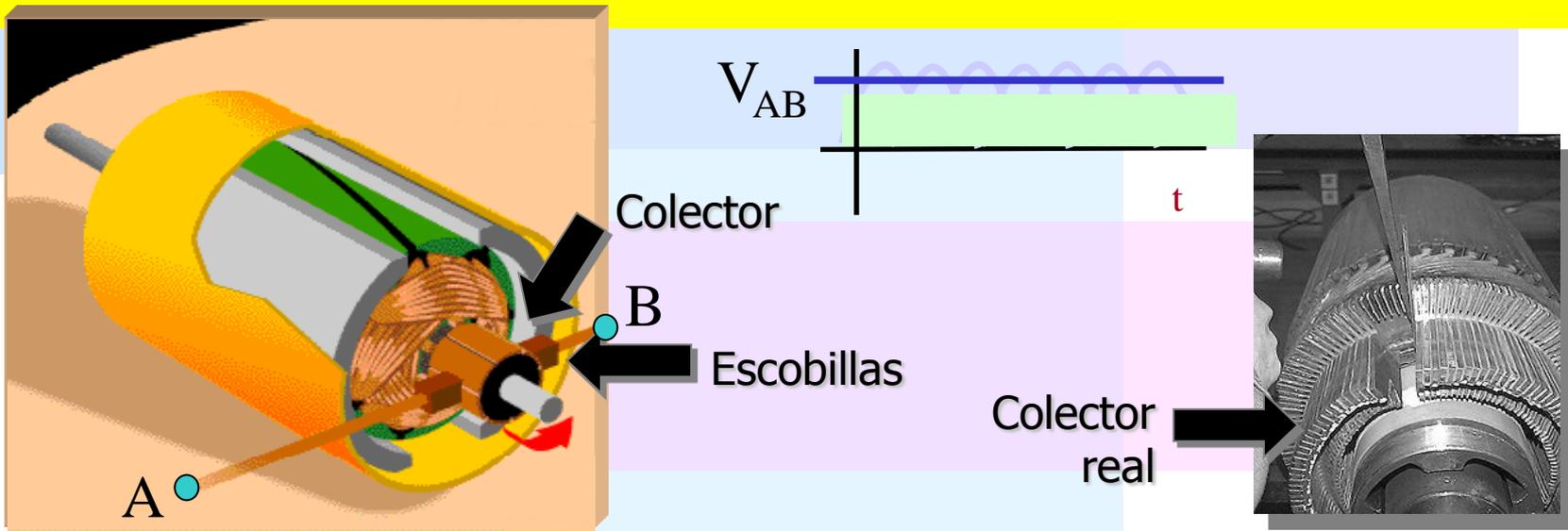
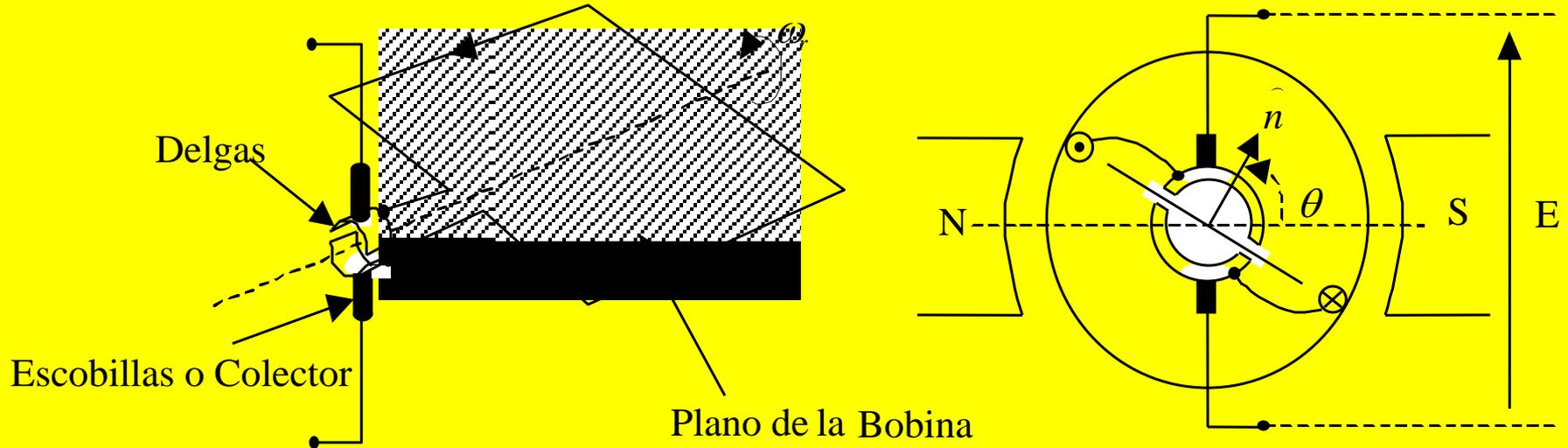
Valor medio no nulo



$$\omega = 2\pi f \Rightarrow T = \frac{1}{f}$$



Generador de Corriente Continua





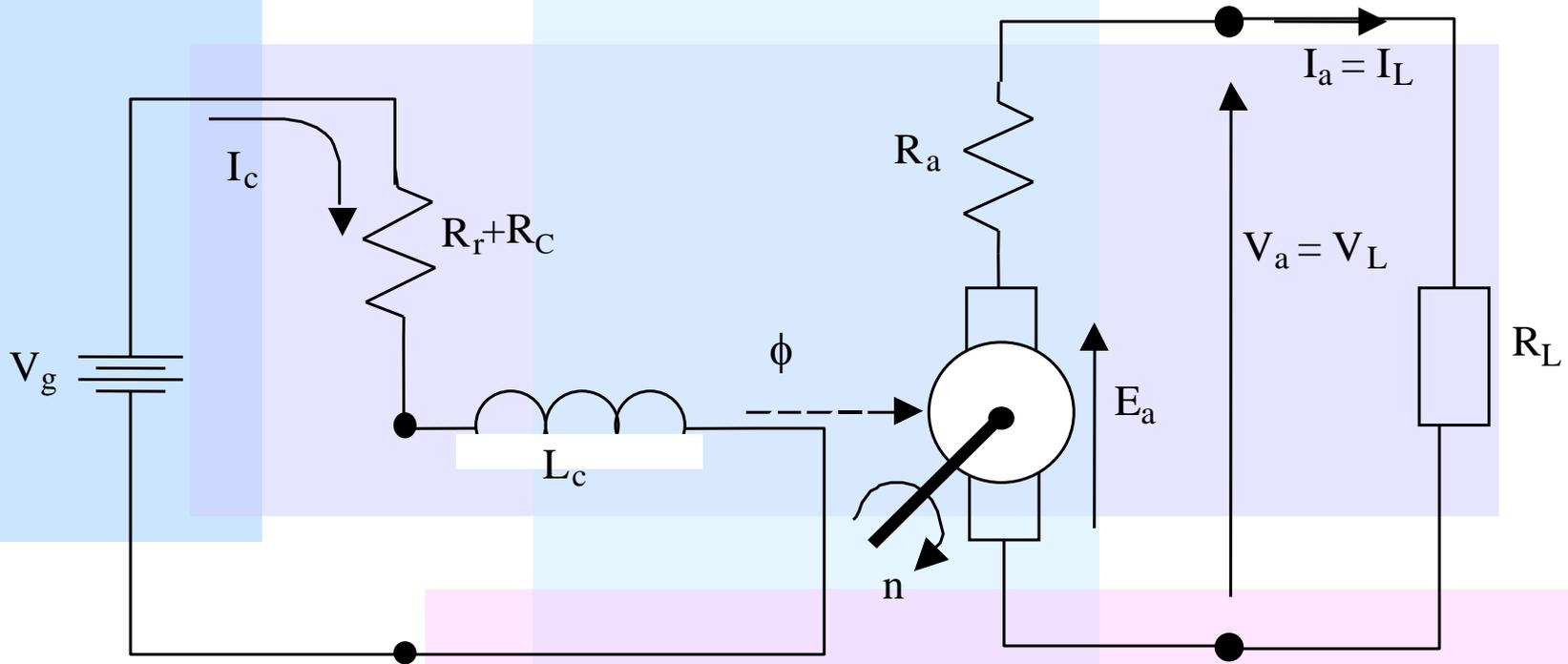
CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

- La conexión de la máquina determina su desempeño y operación: torque, velocidad, control, partida, etc.
- Depende de la alimentación disponible y de los enrollados de campo y armadura.
- Existen las siguientes formas de conexión:
 - Excitación independiente
 - Serie
 - Shunt o paralelo
 - Conexiones mixtas o *compound* (serie-paralelo)



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Generador de excitación independiente



R_r : reóstato que controla a I_c .

R_a, R_c : resistencias enrollados.

R_L : carga conectada.



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Del circuito se deduce que:

$$V_a = V_L$$

$$I_a = I_L$$

$$V_a = R_L \cdot I_L$$

$$V_g = (R_c + R_r) \cdot I_c$$

$$E_a = V_a + R_a \cdot I_a$$

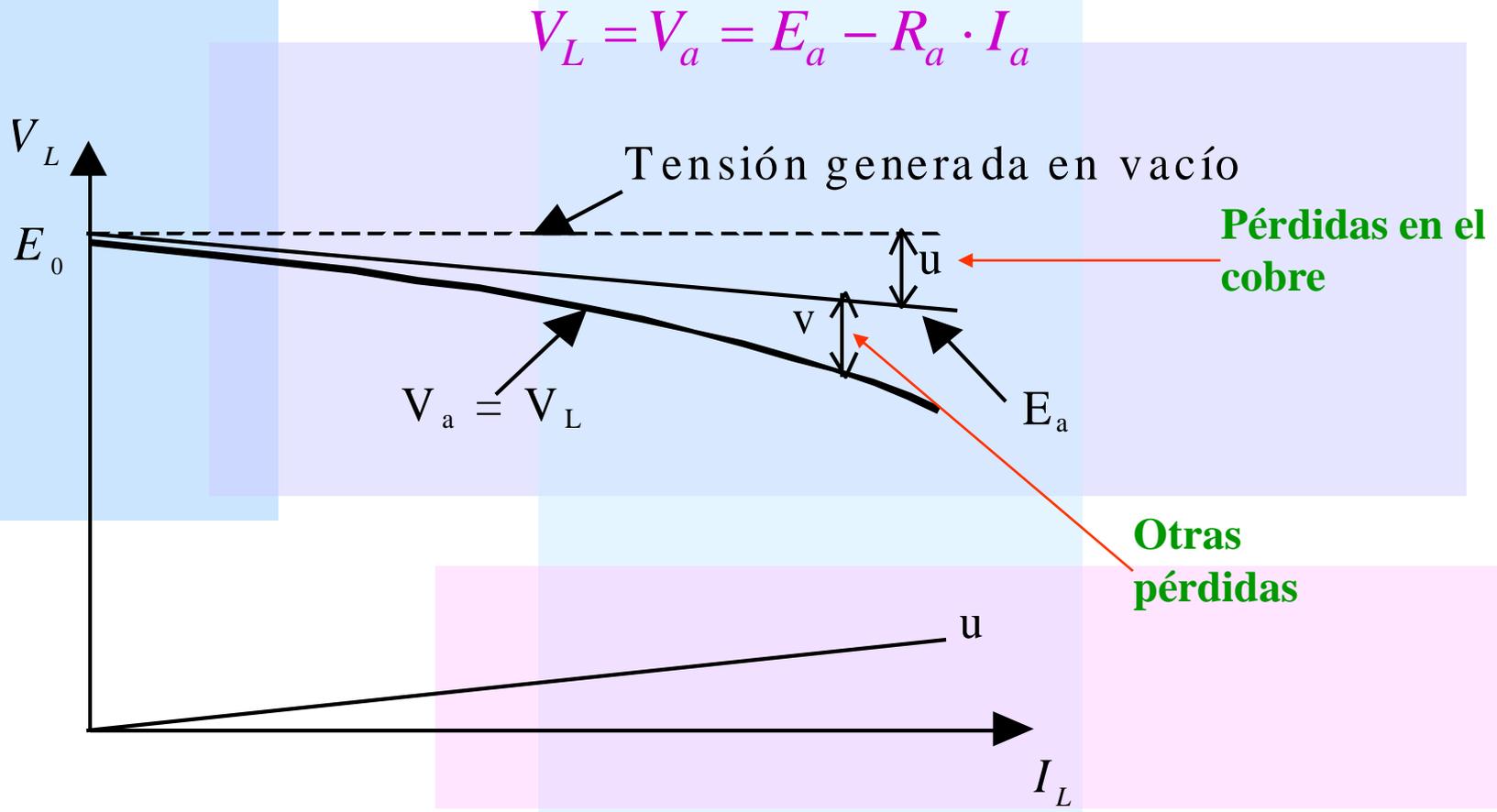
además,

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$

La característica voltaje-corriente de carga, para n e I_c constantes, determina, en la práctica, el desempeño del generador frente a la carga conectada. Ésta considera las caídas internas de tensión de la máquina, así como las pérdidas ya mencionadas.



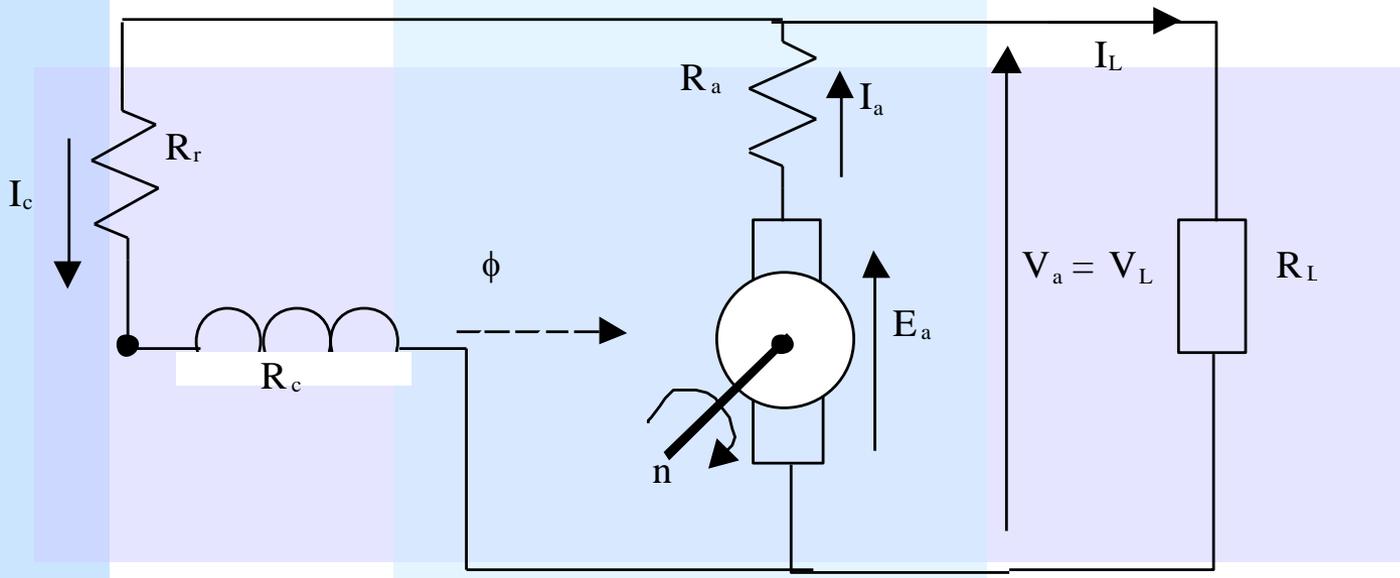
CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Generador Shunt.



Se obtiene:

$$V_a = V_L = V_c$$

$$I_a = I_L + I_c$$

$$V_a = R_L \cdot I_L$$

$$V_c = (R_c + R_r) \cdot I_c$$

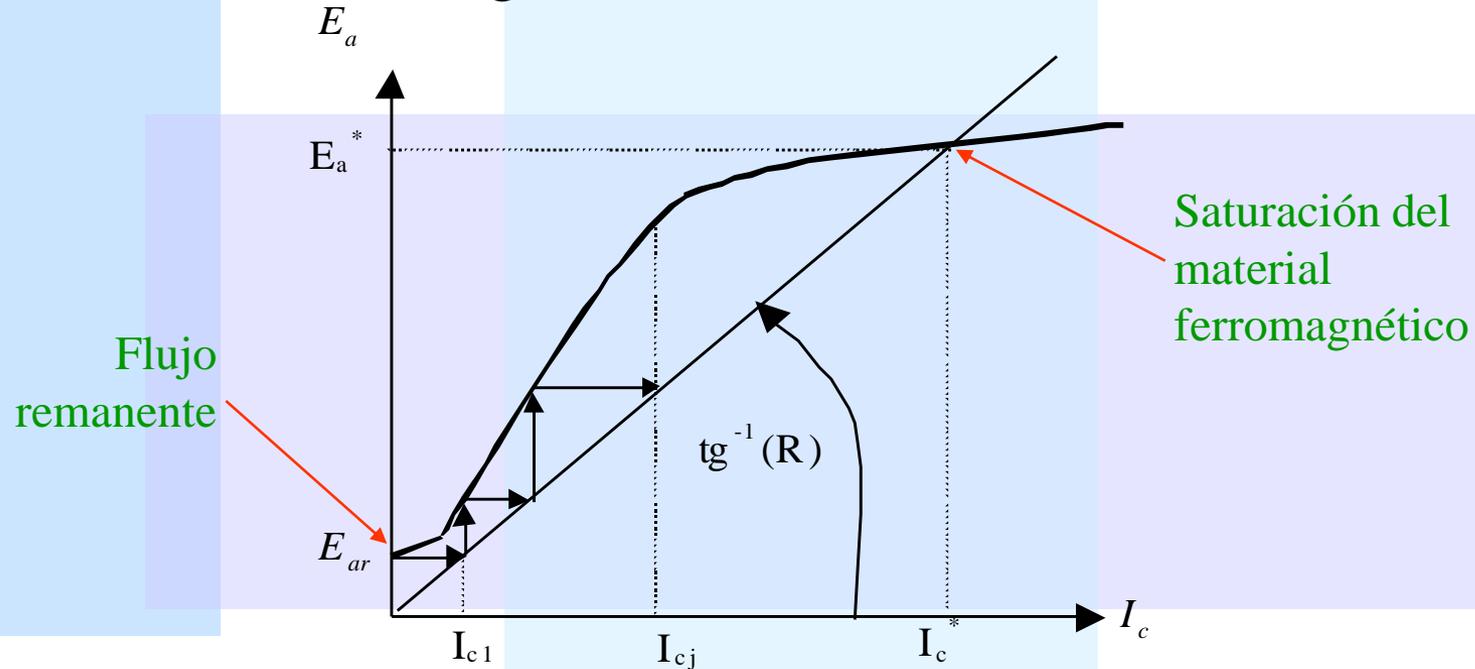
$$E_a = V_a + R_a \cdot I_a$$

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

El generador shunt es un generador auto-excitado (realimentado).



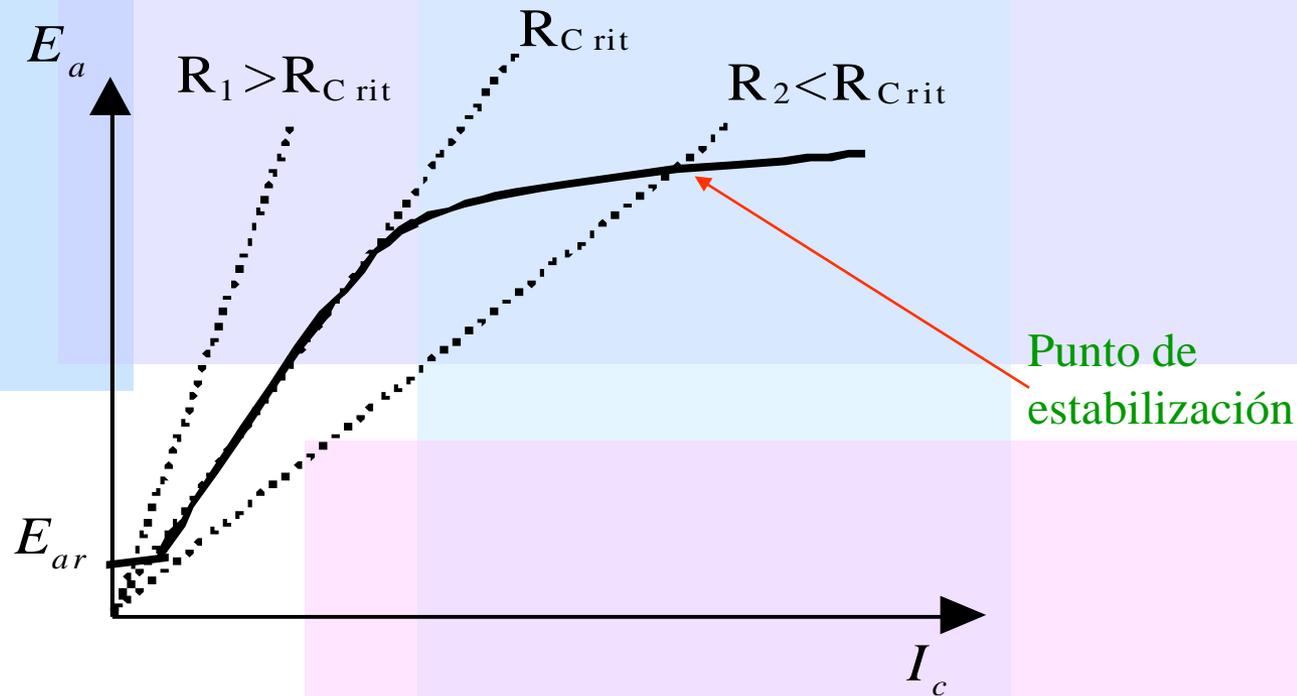
Condiciones para la generación:

- Existencia de un flujo remanente.
- Flujo inicialmente generado debe sumarse al existente.
- R_c debe ser menor a un valor crítico.



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

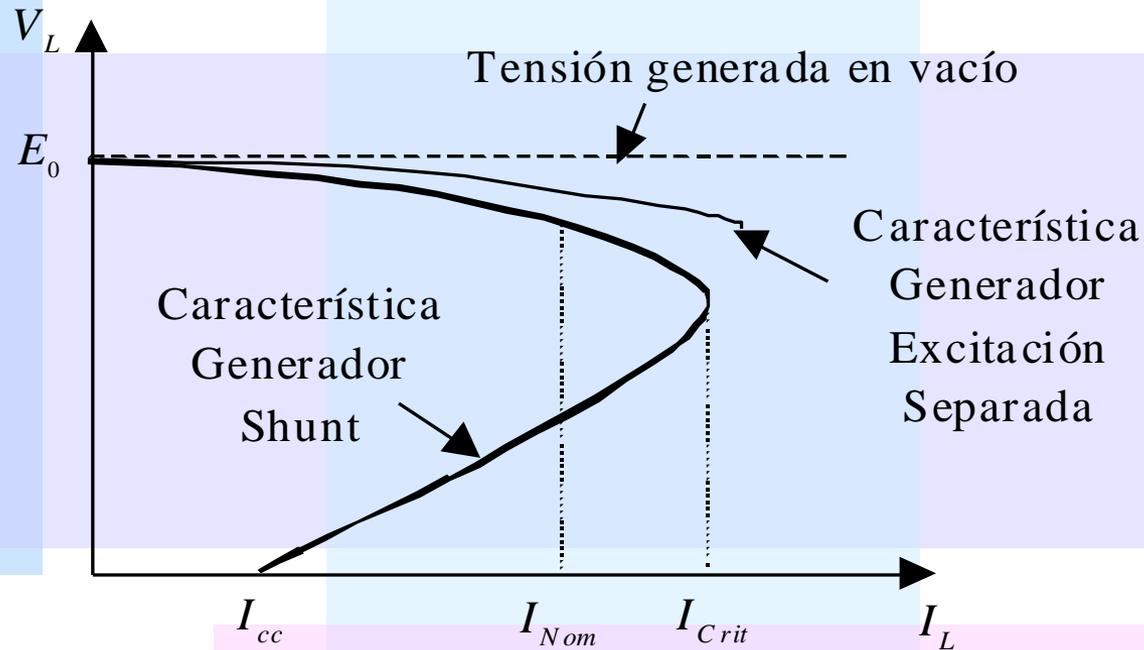
La resistencia crítica está dada por la pendiente de la recta tangente a la curva de saturación del material ferromagnético.





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Característica voltaje-corriente de carga:



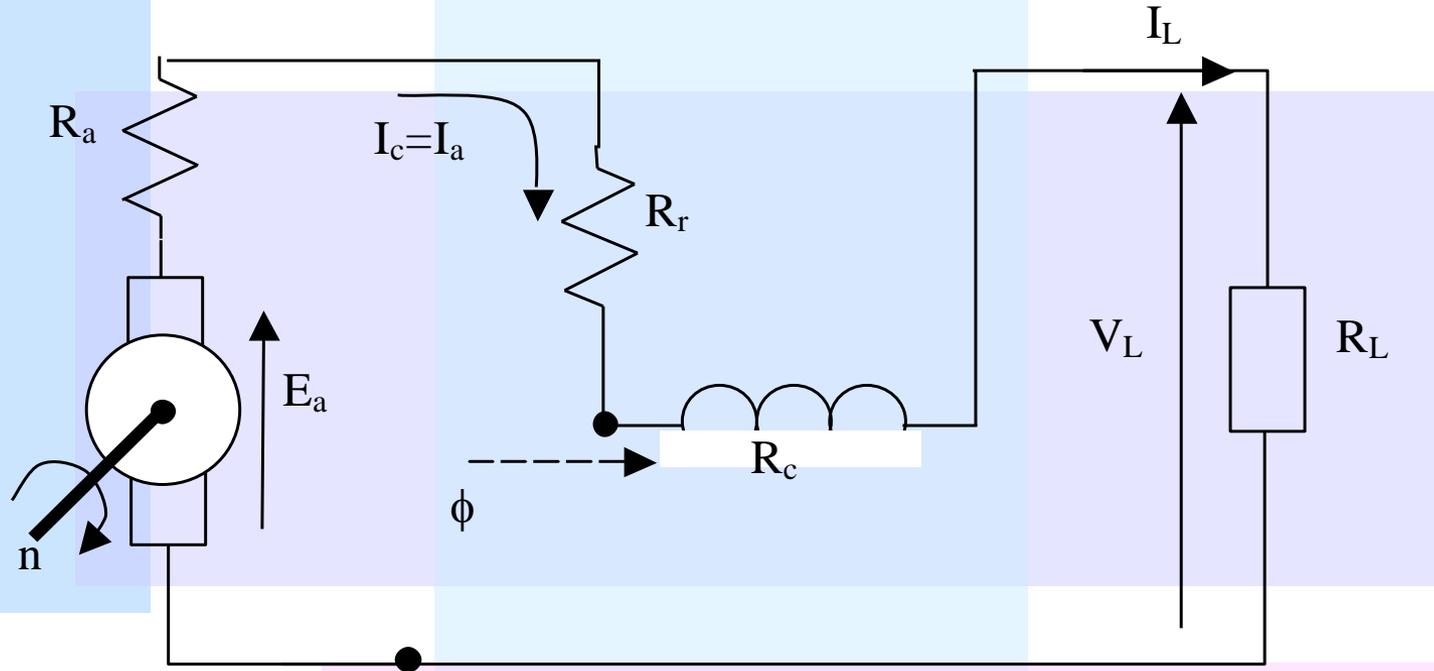
Pérdidas mayores con respecto al generador de excitación separada.

I_{crit} : corriente a partir del cual el voltaje en la carga decae. Frente a un cortocircuito en la carga el generador shunt se auto-protege.



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Generador serie.



Se cumple:

$$E_a = V_L + (R_a + R_c + R_r) \cdot I_a$$

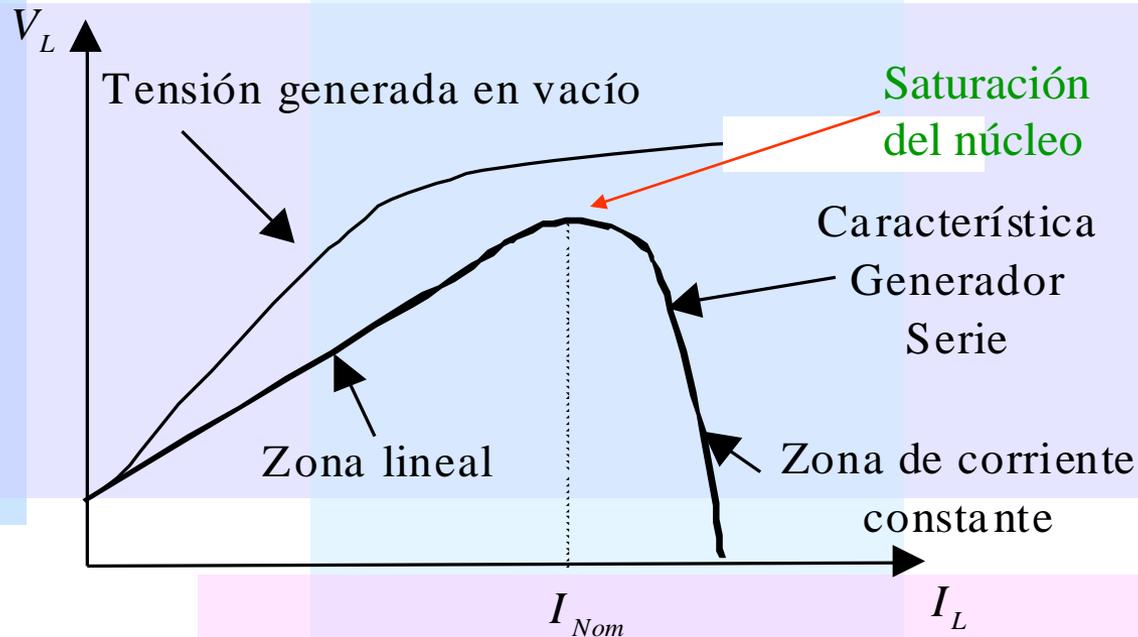
$$V_L = R_L \cdot I_L$$

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Característica voltaje-corriente de carga:



En la zona de corriente constante la caída de tensión se debe mayormente a la reacción de armadura, sumada a las pérdidas Joule.

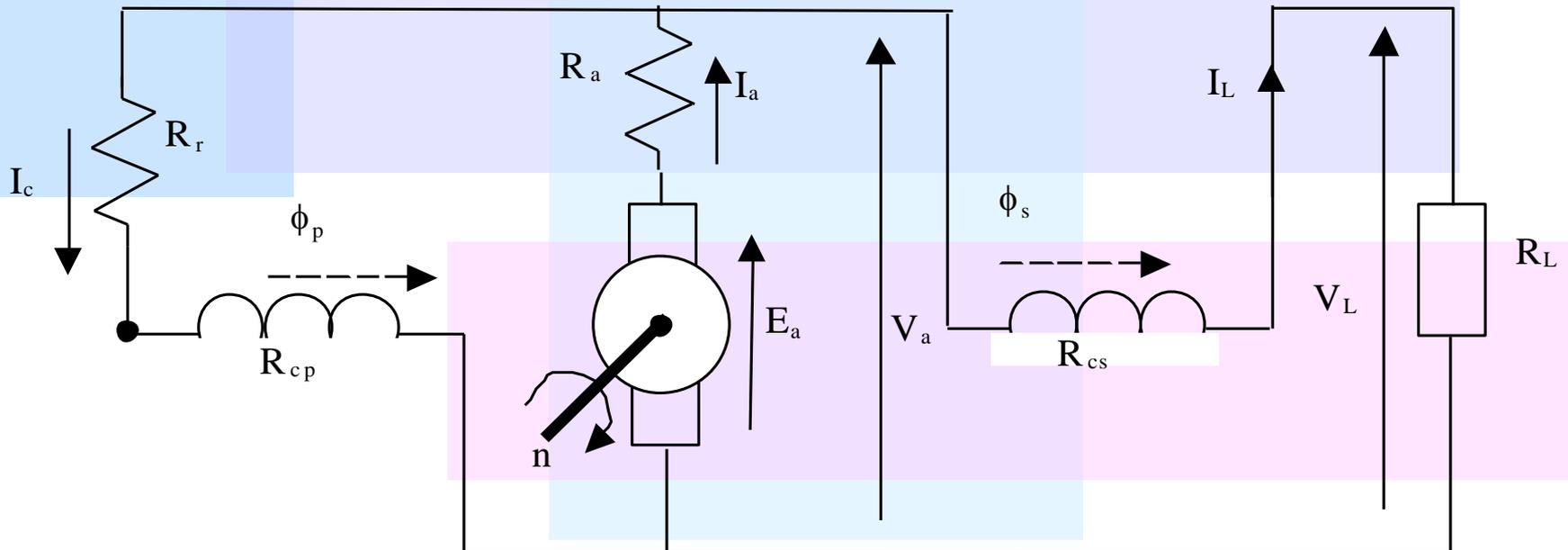


CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Generador compound aditivo.

Máquinas que poseen enrollado de campo serie (R_{cs}) y paralelo (R_{cp}).

En este caso los flujos generados por el campo serie (ϕ_s) y paralelo (ϕ_p) se suman. Si se restan, la configuración es compound diferencial.





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Esta configuración del generador, donde el campo paralelo se conecta en los bornes de la armadura, se denomina compound aditivo con *derivación corta*. Se tiene:

$$E_a = R_a \cdot I_a + V_a$$

$$V_a = V_L + R_{cs} \cdot I_L$$

$$V_L = R_L \cdot I_L$$

$$V_a = (R_{cp} + R_r) \cdot I_c$$

$$I_a = I_L + I_c$$

Además,

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = K_e \cdot n \cdot (\phi_s + \phi_p)$$

$$E_a = G_p \cdot \omega_r \cdot I_c + G_s \cdot \omega_r \cdot I_L$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Si el campo paralelo se conecta después del campo serie, en paralelo con la carga, el generador es de *derivación larga*. Las ecuaciones son:

$$E_a = R_a \cdot I_a + V_a$$

$$V_a = V_L + R_{cs} \cdot I_a$$

$$V_L = R_L \cdot I_L$$

$$V_L = (R_{cp} + R_r) \cdot I_c$$

$$I_a = I_L + I_c$$

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = K_e \cdot n \cdot (\phi_s + \phi_p)$$

$$E_a = G_p \cdot \omega_r \cdot I_c + G_s \cdot \omega_r \cdot I_a$$

En general, la máquina para generar requiere:

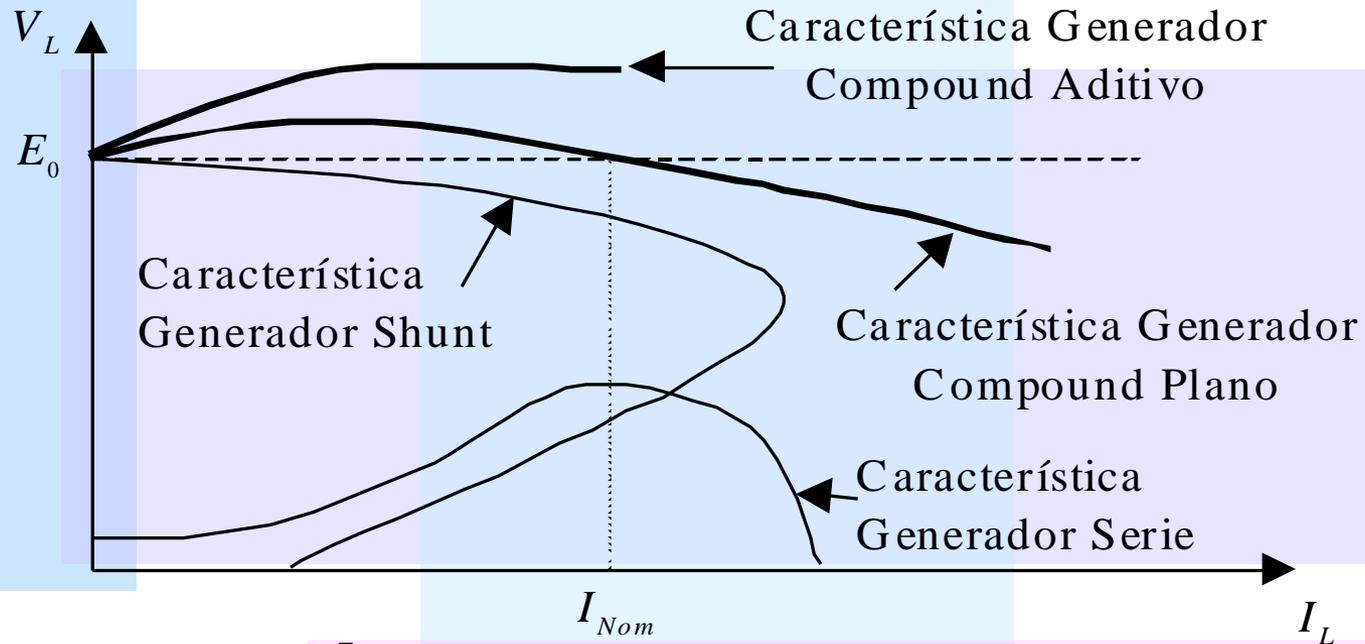
- Existencia de flujo remanente.
- Flujo inicial generado por el campo shunt se suma al remanente.

- $R_{cp} < R_{crit}$.



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Característica voltaje-corriente de carga:



Generador compound:

Parcialmente compuesto o hipocompuesto: predomina efecto shunt.

Hipercompuesto: predomina efecto serie.

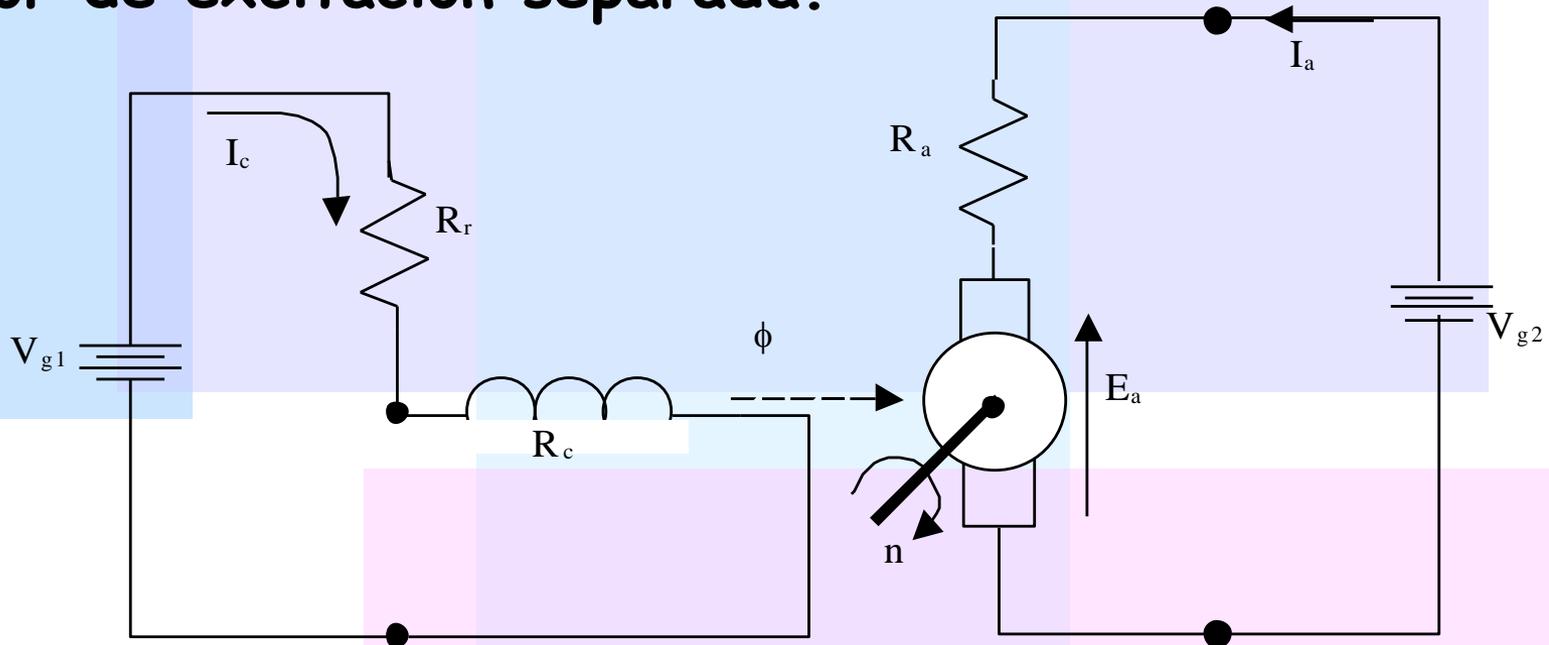
Plano: a I_{Nom} la tensión inducida corresponde a la de vacío.



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

□ **MOTOR DE C.C.** Se utilizan en tracción eléctrica (tranvías, trenes etc.) y en accionamientos donde se requiere un control preciso de la velocidad. Principal desventaja práctica mantención.

• **Motor de excitación separada.**



Donde V_{g1} y V_{g2} son las fuentes de alimentación respectivas del campo y armadura.



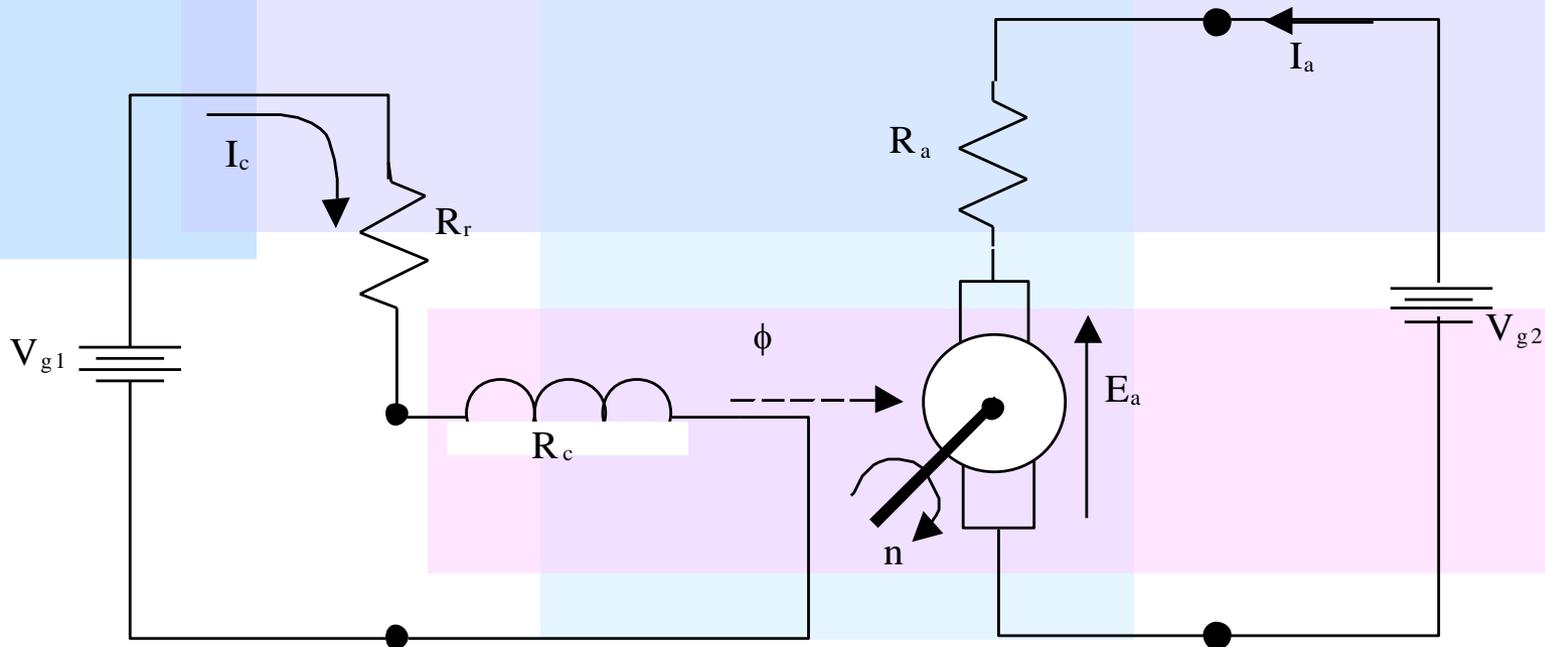
CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

□ MOTOR DE C.C.

$$V_{g1} = (R_c + R_r) \cdot I_c$$

$$E_a = V_{g2} - R_a \cdot I_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$

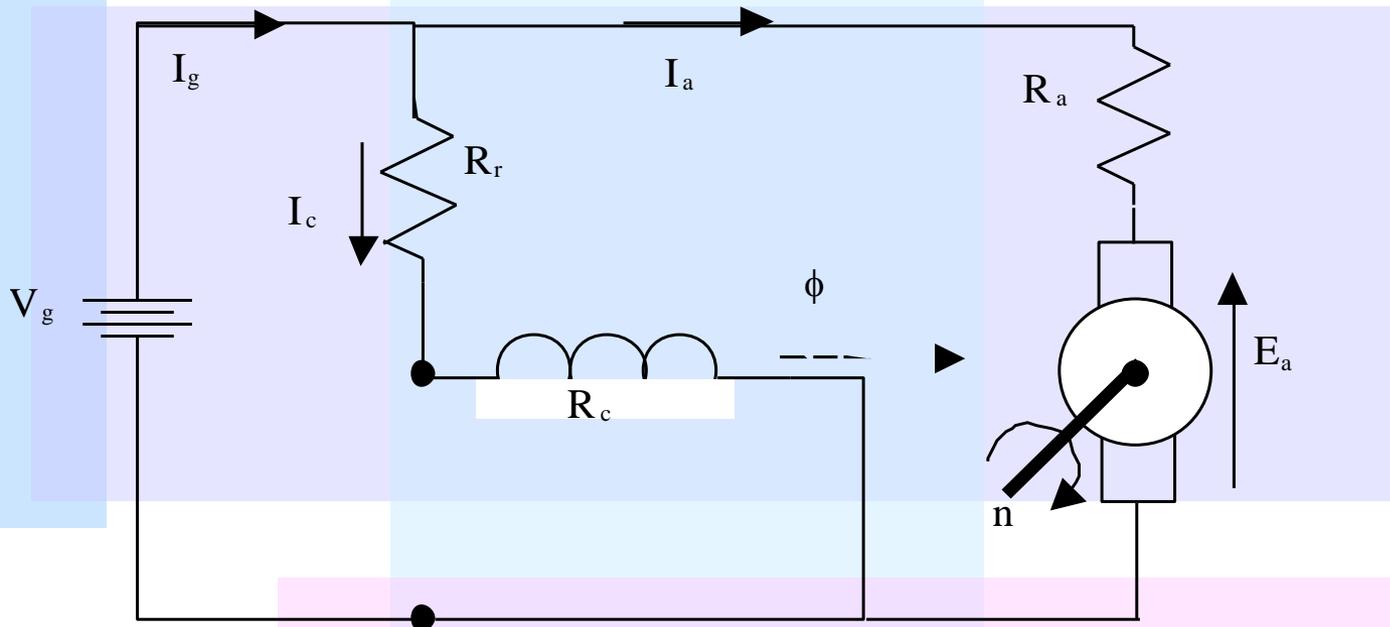
$$T = G \cdot I_c \cdot I_a = K_T \cdot \phi \cdot I_a$$





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Motor shunt.



En ambos casos se suele agregar una resistencia variable en serie con la armadura R_a .



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Para el primer caso, se tiene:

$$V_{g1} = (R_c + R_r) \cdot I_c$$

$$E_a = V_{g2} - R_a \cdot I_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$

$$T = G \cdot I_c \cdot I_a = K_T \cdot \phi \cdot I_a$$

En el caso shunt:

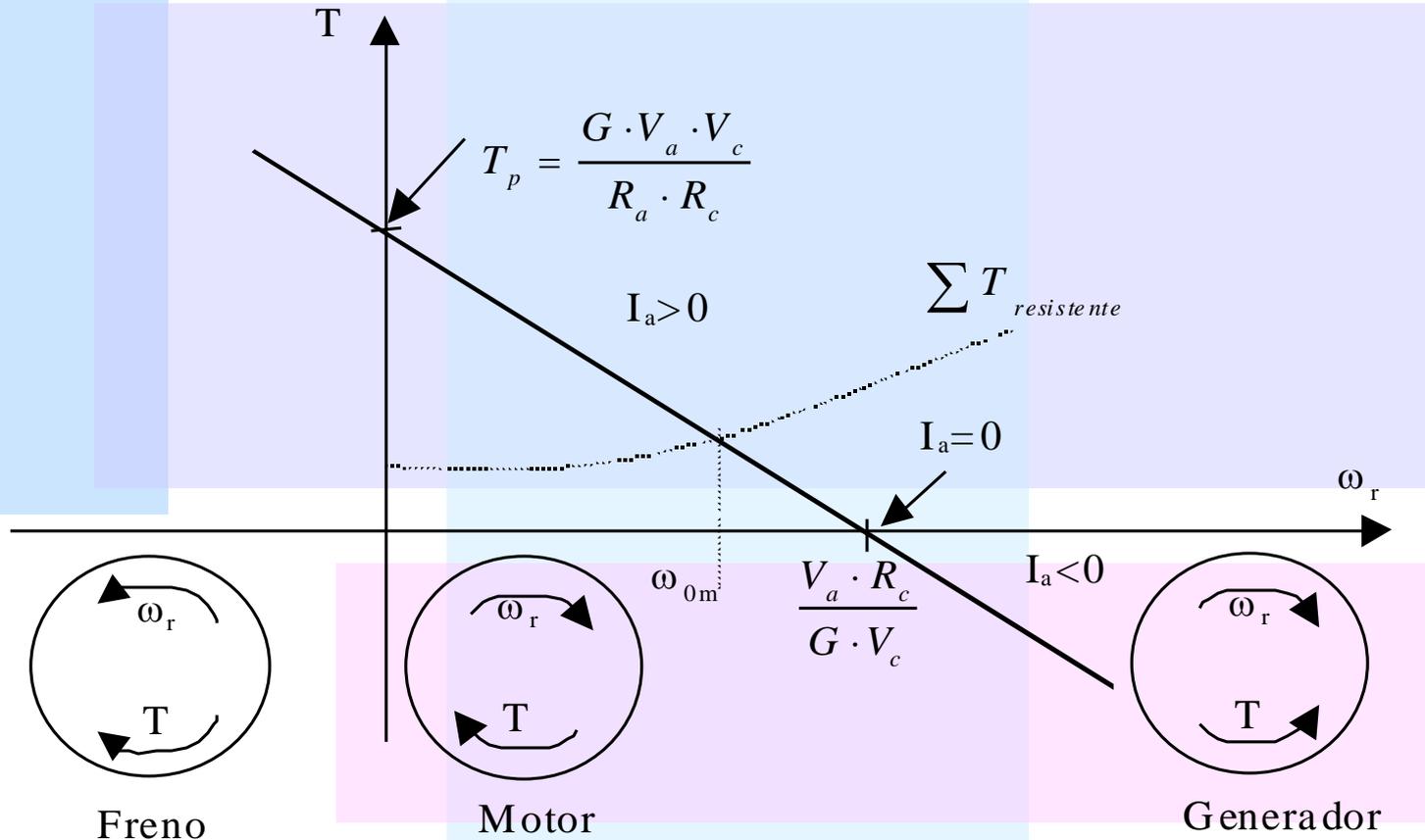
$$V_{g1} = V_{g2} = V_g$$

$$I_g = I_c + I_a$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

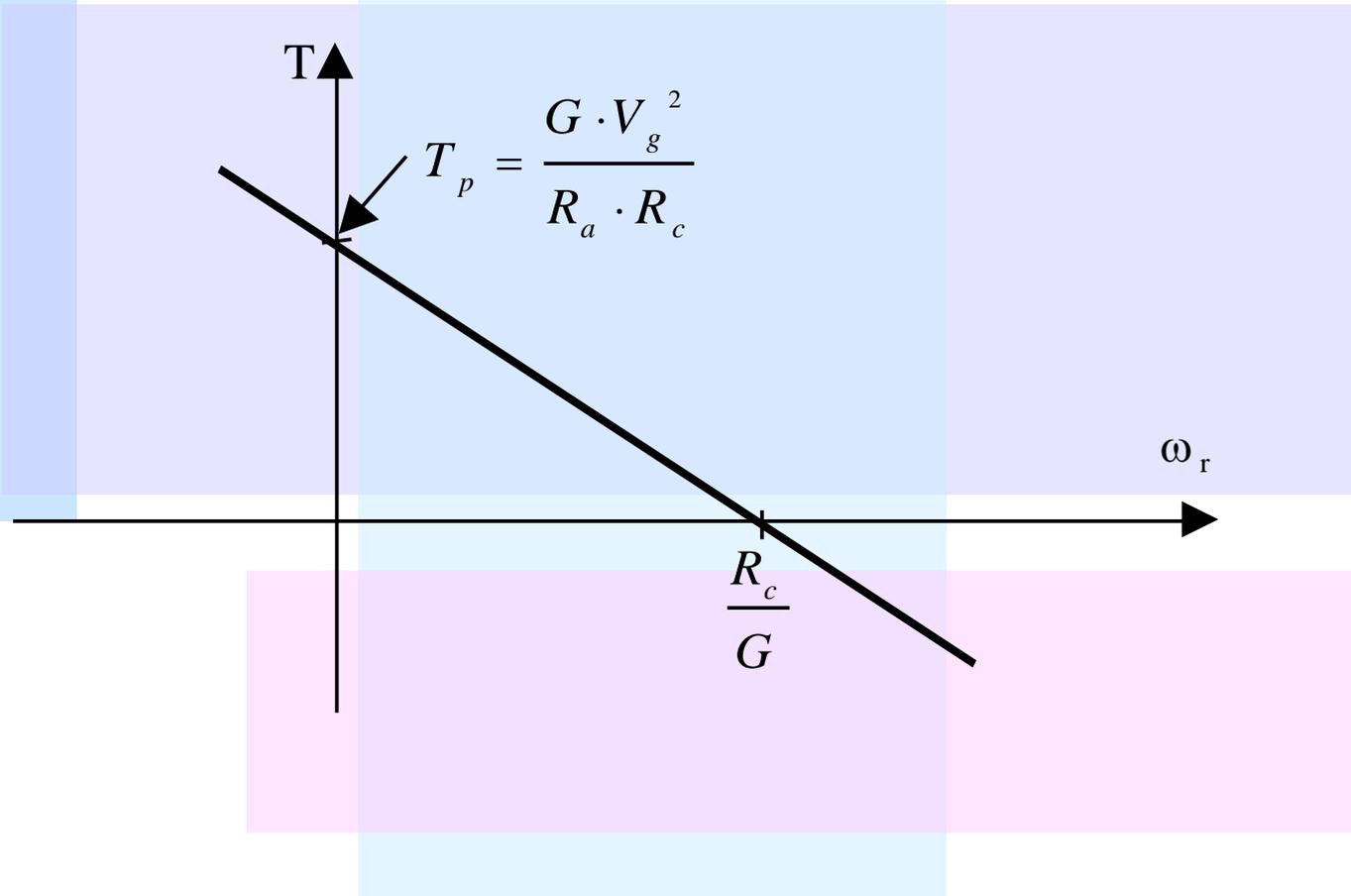
Curva torque-velocidad motor de excitación separada:





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Curva torque-velocidad del motor shunt:





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Con excitación separada:

$$T = G \cdot I_c \cdot I_a$$

$$I_c = \frac{V_{g1}}{R} \quad \text{con } R = R_c + R_r$$

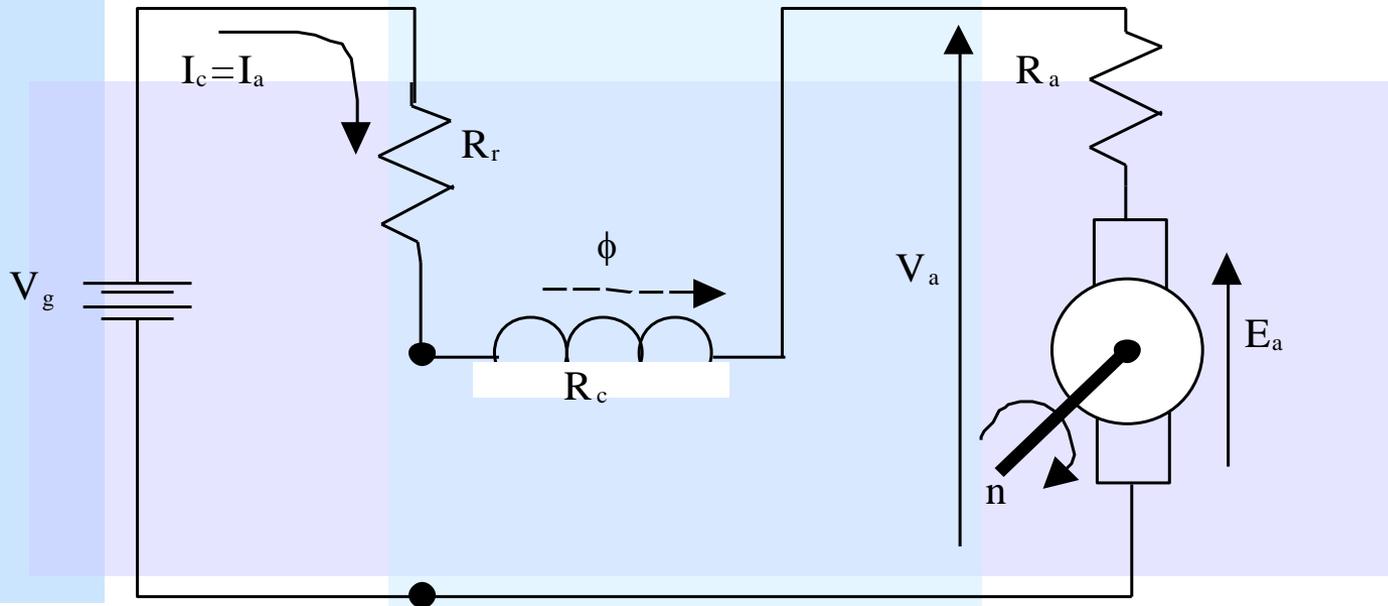
$$I_a = \frac{V_{g2} - E_a}{R_a} = \frac{V_{g2} - G \cdot \omega_r \cdot I_c}{R_a}$$

$$\Rightarrow T = \frac{G \cdot V_{g1} \cdot V_{g2}}{R \cdot R_a} - \frac{G^2 \cdot V_{g1}^2}{R^2 \cdot R_a} \cdot \omega_r$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Motor serie.



Se cumple:

$$I_g = I_c = I_a$$

$$V_g = (R_c + R_r) \cdot I_a + V_a$$

$$E_a = V_a - R_a \cdot I_a$$

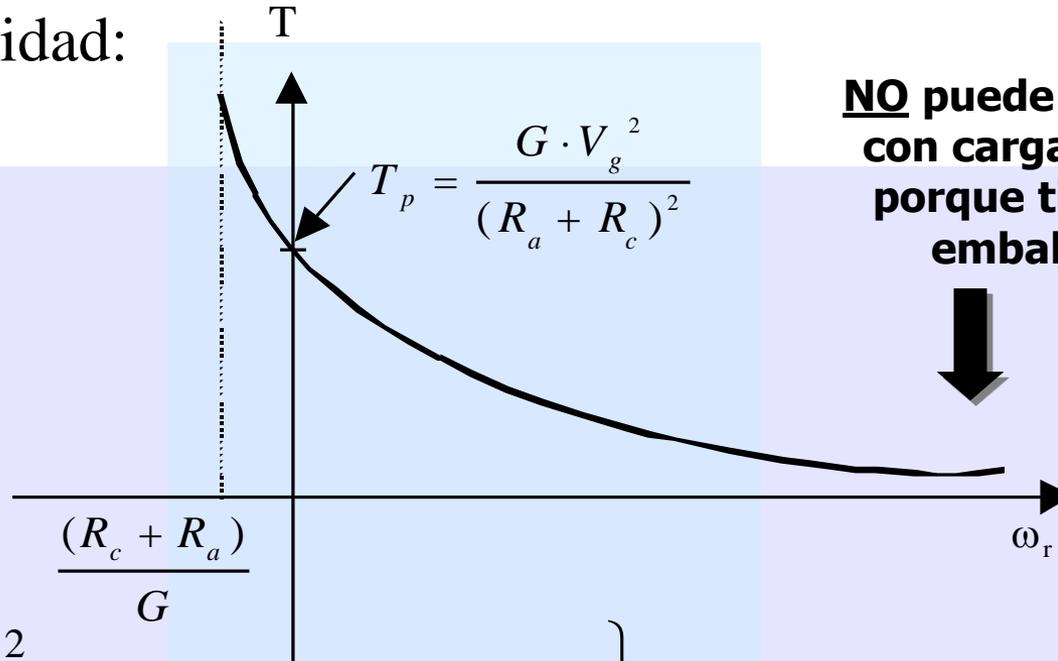
$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$

$$T = G \cdot I_c \cdot I_a = K_T \cdot \phi \cdot I_a$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Curva torque-velocidad:



NO puede trabajar con cargas bajas porque tiende a embalsarse

$$T = G \cdot I_c \cdot I_a = G \cdot I_a^2$$

$$V_g = R \cdot I_a + E_a + R_a \cdot I_a \quad \text{con } R = R_c + R_r$$

$$E_a = G \cdot \omega_r \cdot I_a$$

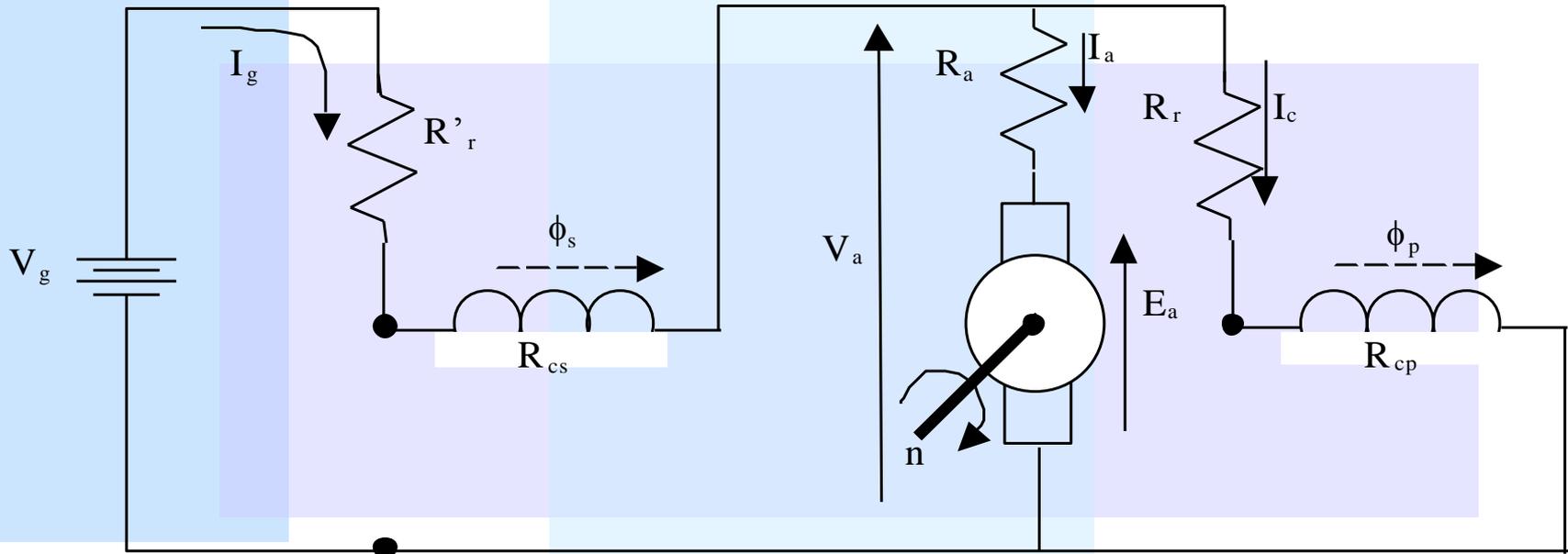
$$I_a = \frac{V_g}{(R + G \cdot \omega_r + R_a)}$$

$$\Rightarrow T = \frac{G \cdot V_g^2}{(R + G \cdot \omega_r + R_a)^2}$$



CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

• Motor compound aditivo.



Del circuito se obtiene:

$$I_g = I_c + I_a$$

$$V_g = (R_{cs} + R'_r) \cdot I_g + V_a$$

$$V_a = E_a + R_a \cdot I_a = (R_{cp} + R_r) I_c$$

$$E_a = K_e \cdot n \cdot \phi = K_e \cdot n \cdot (\phi_s + \phi_p)$$

$$E_a = G_p \cdot \omega_r \cdot I_c + G_s \cdot \omega_r \cdot I_g$$

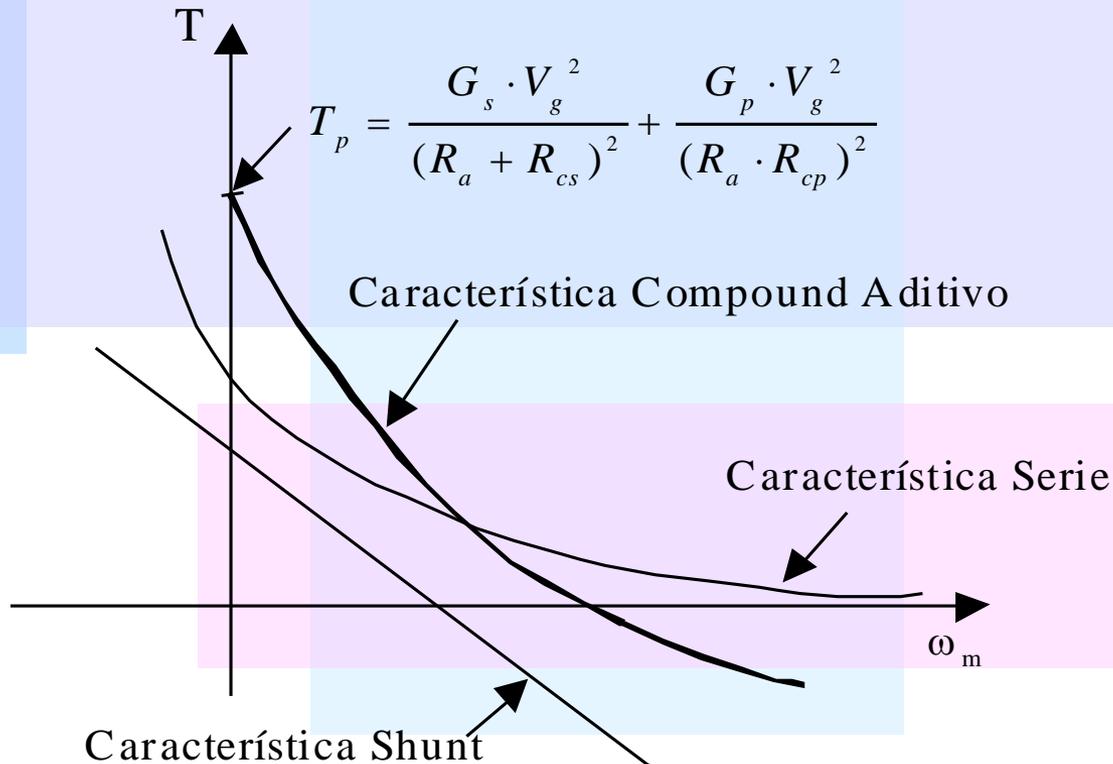


CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

Si se considera $I_g \approx I_a$, se tiene además:

$$T = G_p \cdot I_c \cdot I_a + G_s \cdot I_g \cdot I_a \approx G_p \cdot I_c \cdot I_a + G_s \cdot I_a^2$$

Curva torque-velocidad:





CONEXIONES DE MÁQUINAS DE C.C.

En la curva se considera que:

$$T \approx G_p \cdot I_c \cdot I_a + G_s \cdot I_a^2$$

$$T \approx \frac{G_s \cdot V_g^2}{(R + G_s \cdot \omega_r + R_a)^2} + \frac{G_p \cdot V_a^2}{R_a \cdot R} - \frac{G_p \cdot V_a^2}{R_a \cdot R^2} \cdot \omega_r$$

con $R = R_c + R_r$

si además $V_a \approx V_g$:

$$T \approx \frac{G_s \cdot V_g^2}{(R + G_s \cdot \omega_r + R_a)^2} + \frac{G_p \cdot V_g^2}{R_a \cdot R} - \frac{G_p^2 \cdot V_g^2}{R_a \cdot R^2} \cdot \omega_r$$



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE MÁQUINAS DE C.C.

Algunas máquinas C.C permiten conectar el campo en paralelo (*shunt*) o en serie con la armadura. Constructivamente:

- Enrollado shunt: baja sección, alta resistividad y de muchas vueltas.
- Enrollado serie: de alta sección, baja resistividad y de pocas vueltas.

Placa de conexiones de la carcaza:

Elemento	Terminales de conexión según Norma			
	VDE	ASA	BS	IEC
Armadura	A-B	A ₁ -A ₂	AA-A	A ₁ -A ₂
Campo shunt	C-D	F ₁ -F ₂	Z-ZZ	E ₁ -E ₂
Campo serie	E-F	S ₁ -S ₂	Y-YY	D ₁ -D ₂
Interpolos	G-H	-	HH-H	B ₁ -B ₂
Interpolo simétricamente distribuido en el lado A	GA-HA	-	-	1B ₁ -1B ₂
Interpolo simétricamente distribuido en el lado B	GB-HB	-	-	2B ₁ -2B ₂
Campo de excitación separada ⁽¹⁾	I-K	F ₁ -F ₂	X-XX	F ₁ -F ₂



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE MÁQUINAS DE C.C.

- Primera máquina en ser desarrollada (Gramme, belga, 1860), luego, perfeccionada por W. Siemens.
- Diseño más complejo que las máquinas de C.A.:
 - Menos robusta, mayor mantención, más volumen y peso por kW.
- Principales ventajas:
 - Amplio rango de velocidades.
 - Característica torque-velocidad variable.
 - Rápida aceleración/desaceleración y cambio de sentido de giro.
 - Frenado regenerativo.