



Máquinas de Corriente Continua



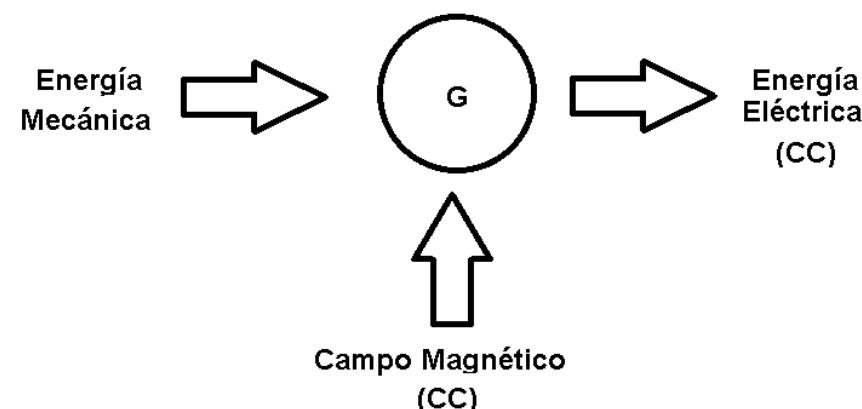
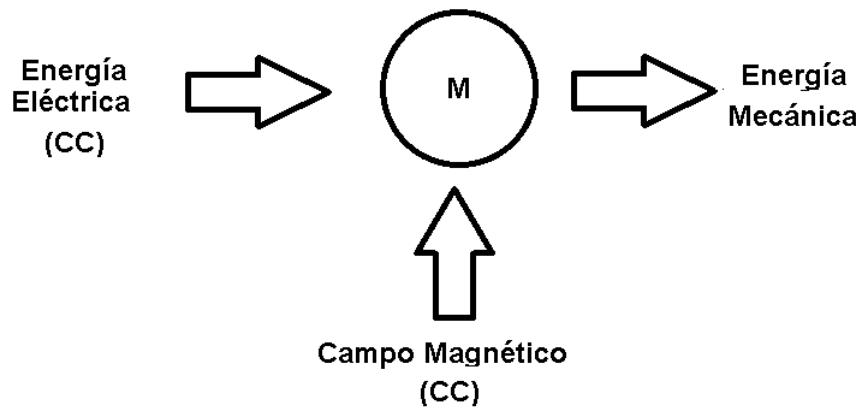
**Universidad Francisco
de Paula Santander**
Vigilada Mineducación

MÁQUINAS DC

Dr. Jaime A. González C.

Definición

- Una Máquina de Corriente Continua es aquella que convierte energía mecánica en energía eléctrica o viceversa utilizando el principio de inducción magnética y que utiliza fuentes de corriente continua



Repasso de Teoría Electromagnética

- Ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \bullet B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

James Clerk Maxwell

- Nace en 1831 en Edimburgo
- A los 14 años publica su primer artículo Oval Curves
- Admitido en la Universidad de Edimburgo los 16 años
- Estudio Matemáticas y Física

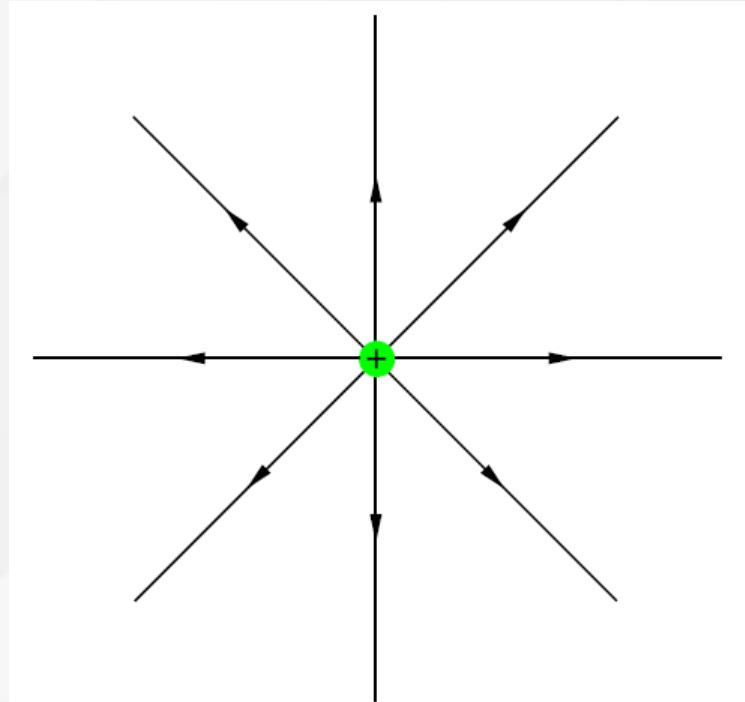
Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Basada en la Ley de Coulomb
 - ❖ Dos cargas eléctricas se atraen o repelen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de ambas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa
- E: Campo Eléctrico, una idea de la intensidad de la fuerza eléctrica

Divergencia de $E(\nabla \bullet E)$

- Ejemplo de la Tina
- La $\nabla \bullet E$ nos indica, en donde nace o muere (y con que intensidad) el campo Eléctrico
 - (+): nace
 - (-): muere
 - (0): no sucede nada



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

➤ ρ : Densidad de carga Eléctrica, cuanto mayor sea, más carga se encuentra

(+): carga positiva
(-): carga negativa

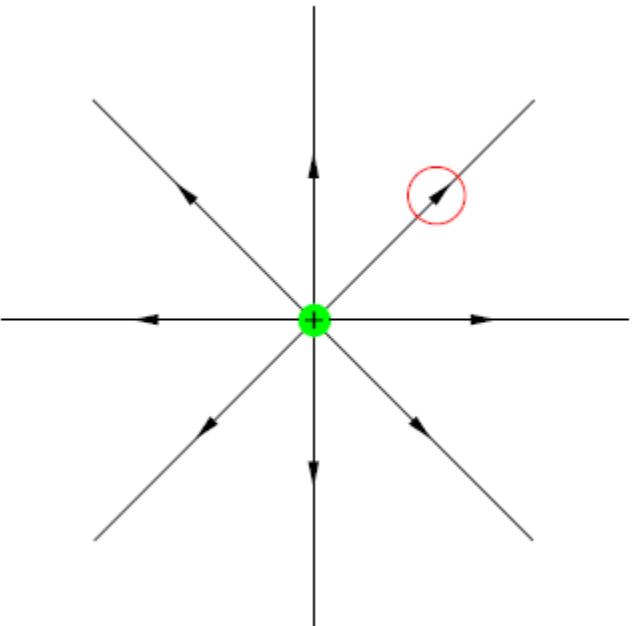
Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío
- ϵ_0 : $8,85 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ s}^4 \text{ Kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$
- (+): carga positiva
- (-): carga negativa

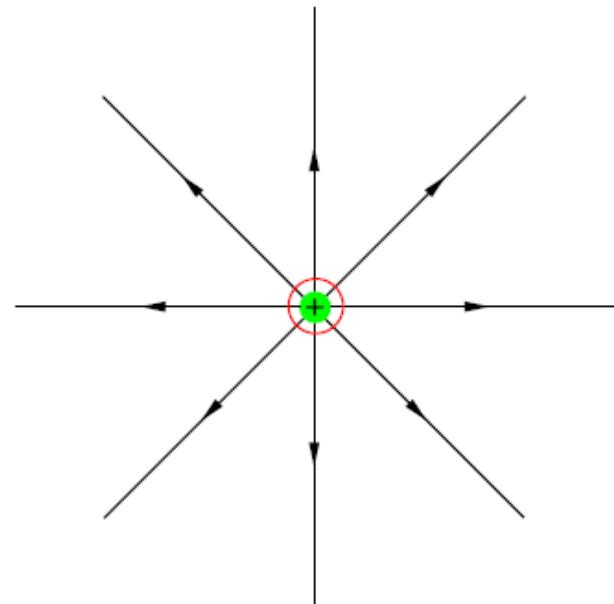
Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = 0$$



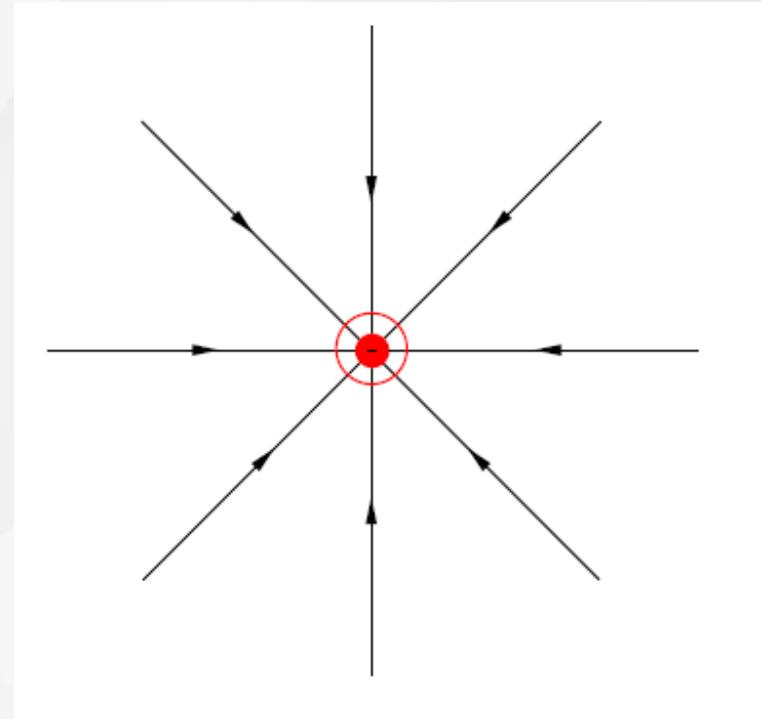
Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E > 0$$



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

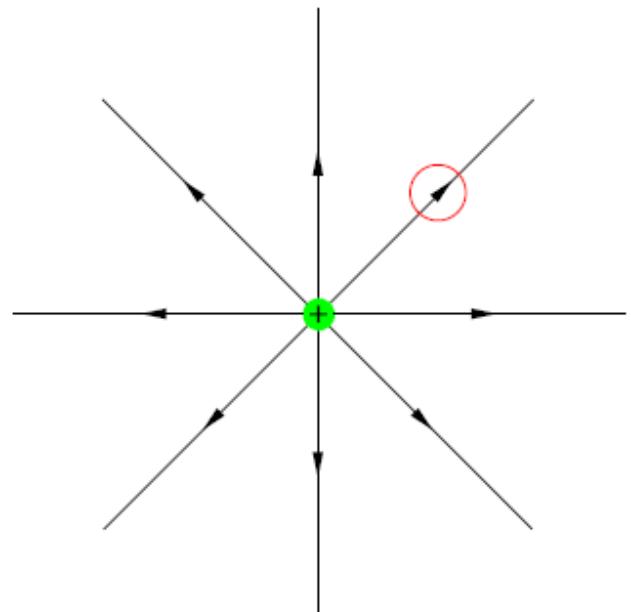
$$\nabla \bullet E < 0$$



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = 0$$

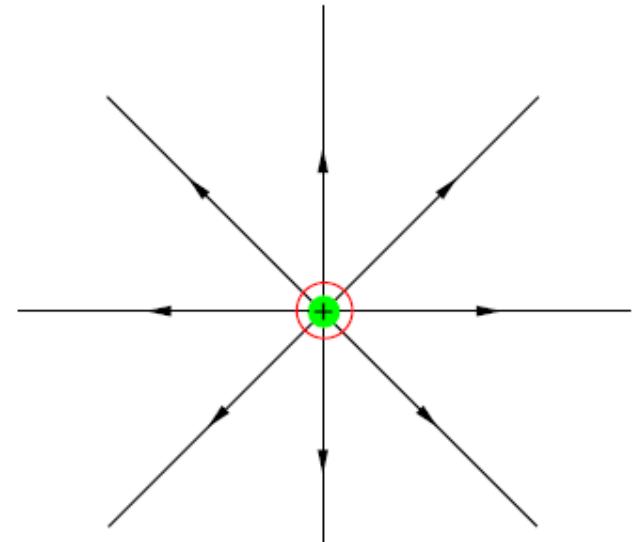
No hay cargas de ningún tipo en al área seleccionada



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E > 0$$

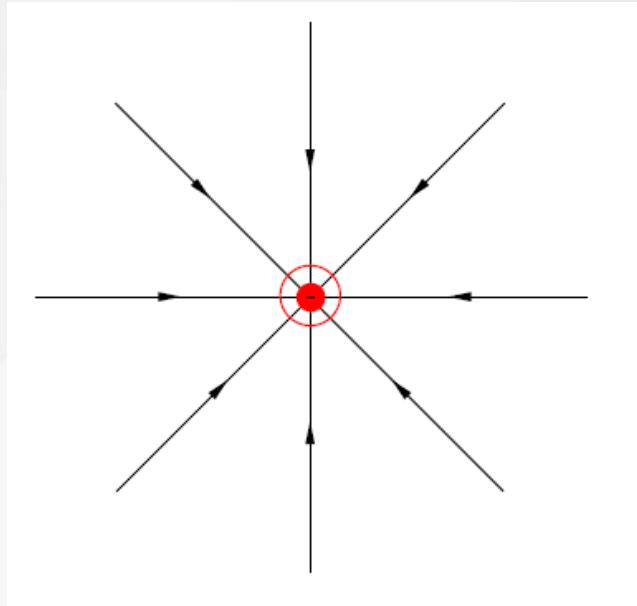
Hay cargas positivas en al área
seleccionada



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

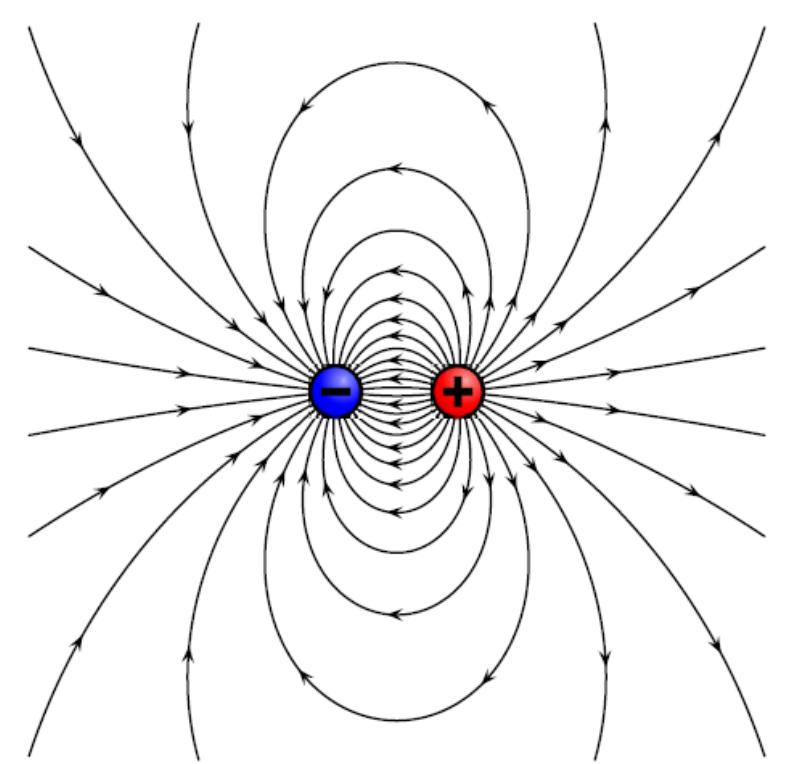
$$\nabla \bullet E < 0$$

Hay cargas negativas en al área seleccionada



Ley de Gauss para el Campo Eléctrico

$$\nabla \bullet E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$



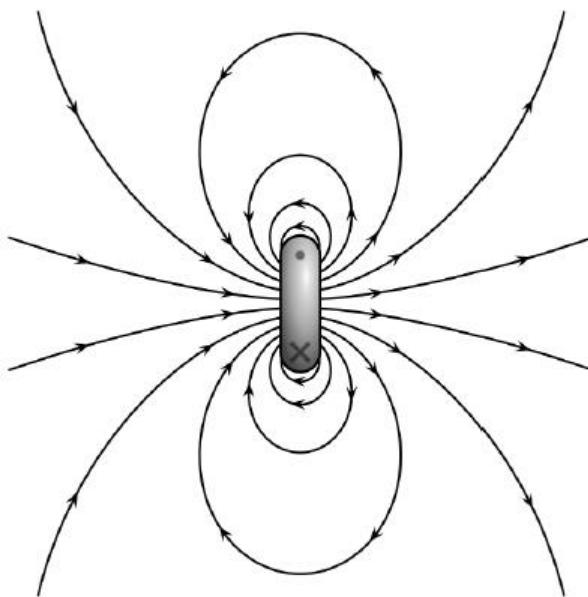
Ley de Gauss para el Campo Magnético

$$\nabla \cdot B = 0$$

- Las Líneas de Campo son siempre cerradas!!!

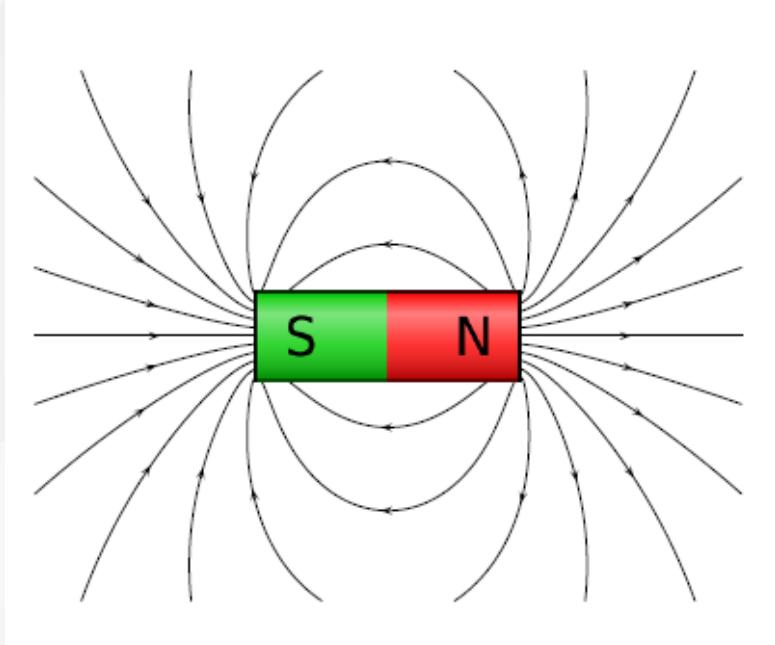
Ley de Gauss para el Campo Magnético

$$\nabla \bullet B = 0$$



Ley de Gauss para el Campo Magnético

$$\nabla \bullet B = 0$$



Ley de Gauss para el Campo Magnético

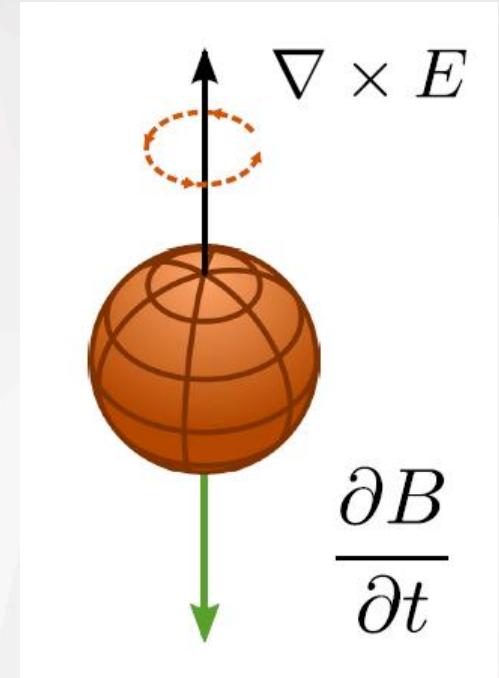
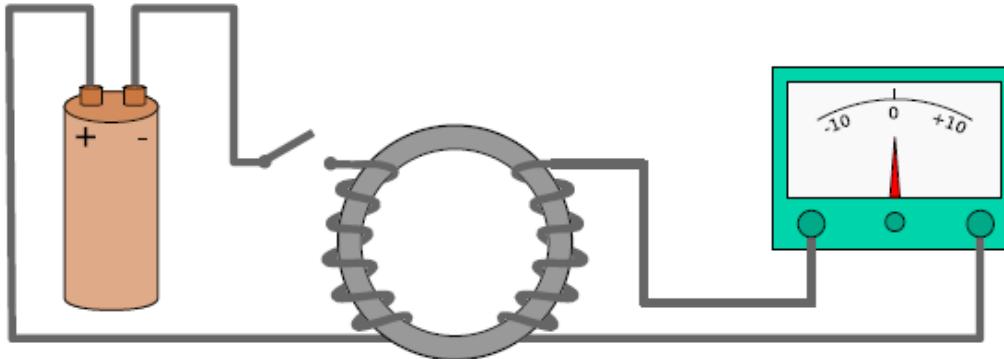
- Existen entonces dipolos eléctricos y dipolos magnéticos
- La mitad de un dipolo eléctrico es un monopolo eléctrico
- No existe un Monopolio Magnético (por ahora!!!!)

$$\nabla \bullet B = \mu_0 \rho_m$$

Ley de Faraday

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Ley de Faraday



- El campo magnético variable en el tiempo es capaz de producir un Campo Eléctrico de la nada!!!

Ley de Ampere (Ampere - Maxwell)

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

- El campo magnético mostró ser más intenso sí la corriente se elevaba
- El Campo Magnético mostró ser más intenso cerca del alambre (proporcionalidad inversa a la distancia)
- El Campo Magnético mostró ser perpendicular al cable

Ley de Ampere (Ampere - Maxwell)

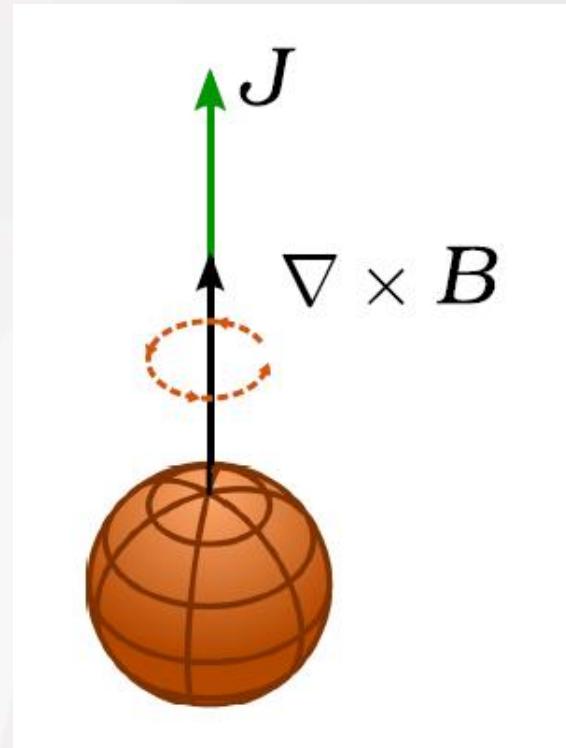
Inicialmente:

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$

- μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío

$$4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

- J : Densidad de la Corriente Eléctrica



Ley de Ampere (Ampere - Maxwell)

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

- Un campo eléctrico variable en el tiempo produce un rotacional del Campo magnético incluso en ausencia de la corriente

Máquina Eléctrica

- Una máquina eléctrica es aquel dispositivo que convierte:
 - Energía Mecánica en Energía Eléctrica (Generador)
 - Energía Eléctrica en Energía Mecánica (Motor)
 - Energía Eléctrica en Energía Eléctrica (Transformador)
- **PARA ESTOS TRES TIPOS DE CASOS SE REQUIERE “SIEMPRE” CAMPO MAGNÉTICO**

Ecuaciones Esenciales de Campo Magnético

- Un conductor por el cual circula una Corriente produce un Campo Magnético a su alrededor

- Un Campo Magnético variable en el tiempo induce una tensión en una bobina si éste campo la atraviesa.
(Transformador)

Ecuaciones Esenciales de Campo Magnético

- Un conductor por el cual circula una corriente y es atravesado por un Campo Magnético producirá en el conductor una fuerza (Motor)

- Siempre que exista una diferencia de velocidad entre un conductor y su campo que lo atraviesa, se inducirá en dicho conductor una tensión (Generador)

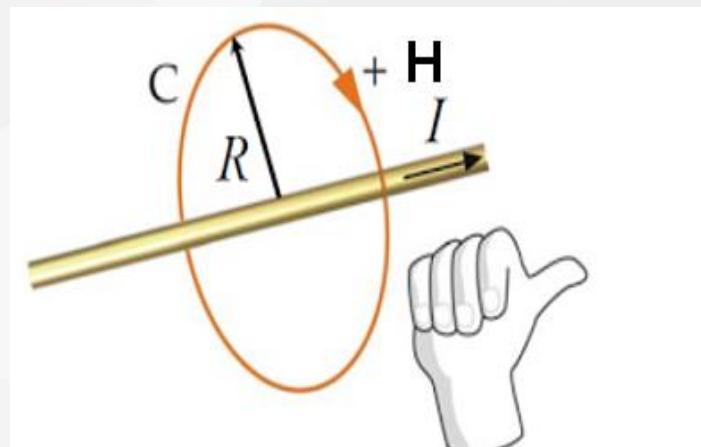
Intensidad Magnética (H)

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$

$$\oint H dl = I_{neto}$$

- Para N espiras se tendrá:

$$H * l_c = NI$$

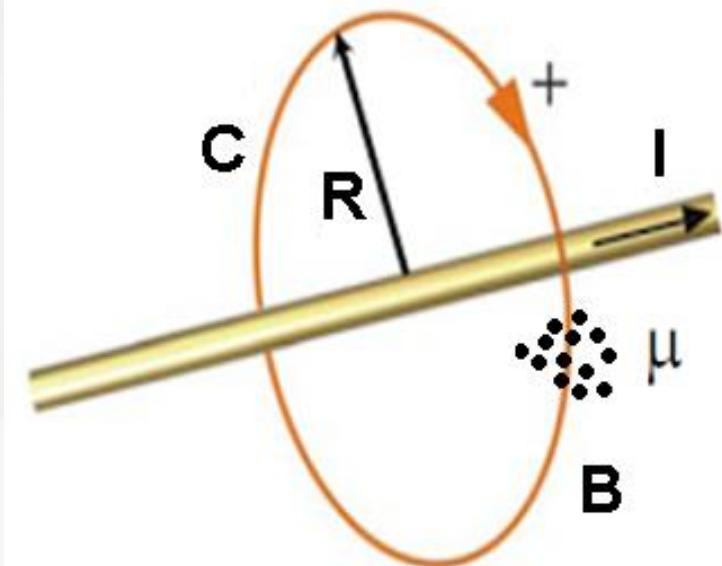


Densidad de Campo Magnético(B)

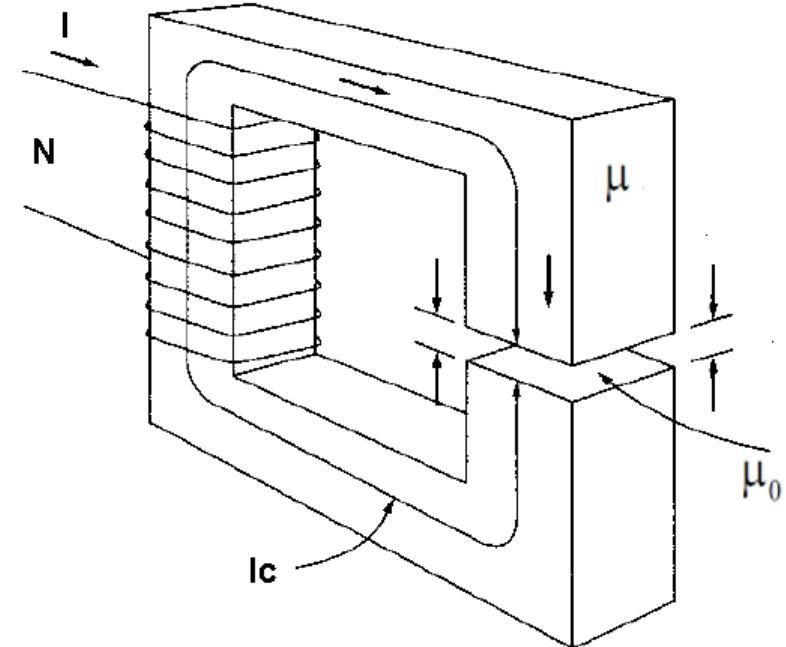
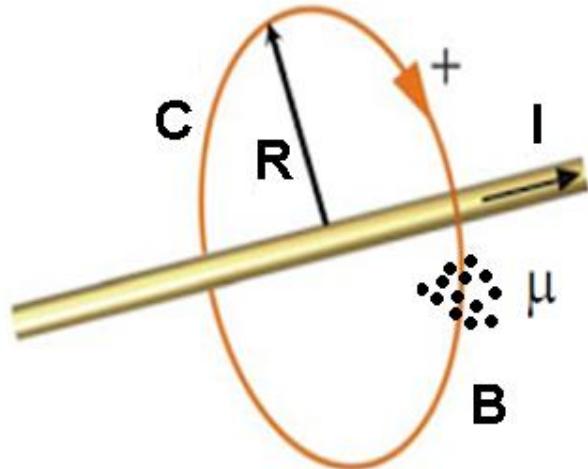
$$B = \mu H$$

- μ : Permeabilidad Magnética

$$B = \mu H = \frac{\mu NI}{l_c}$$



Permeabilidad Magnética

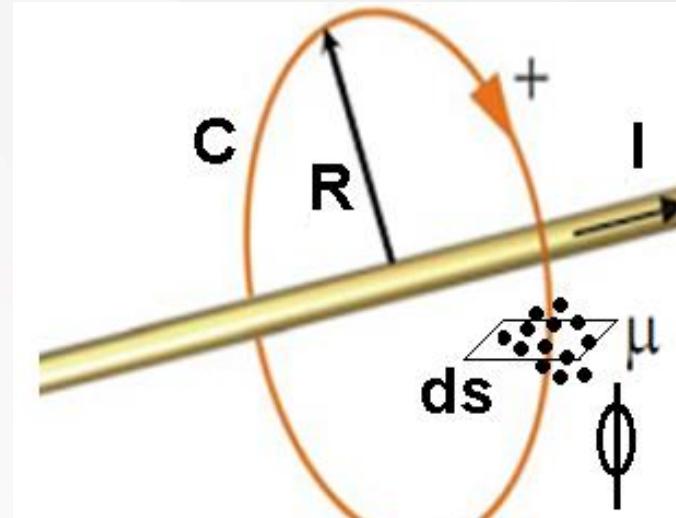


Flujo Magnético (Φ)

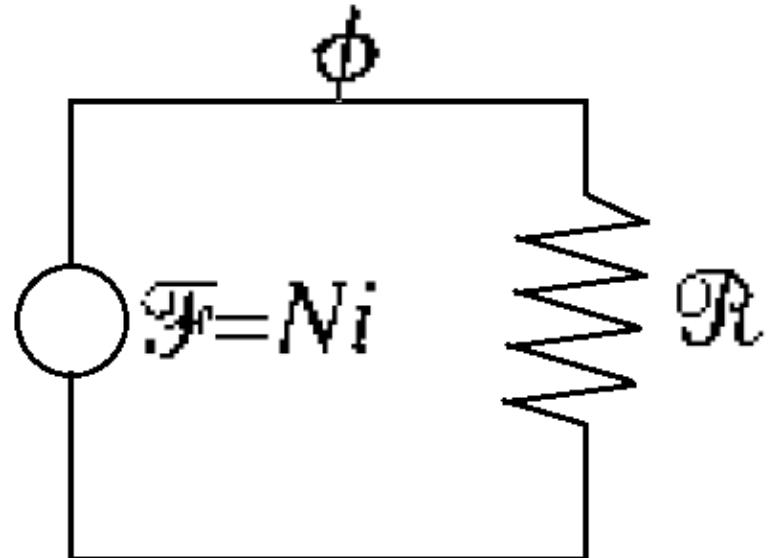
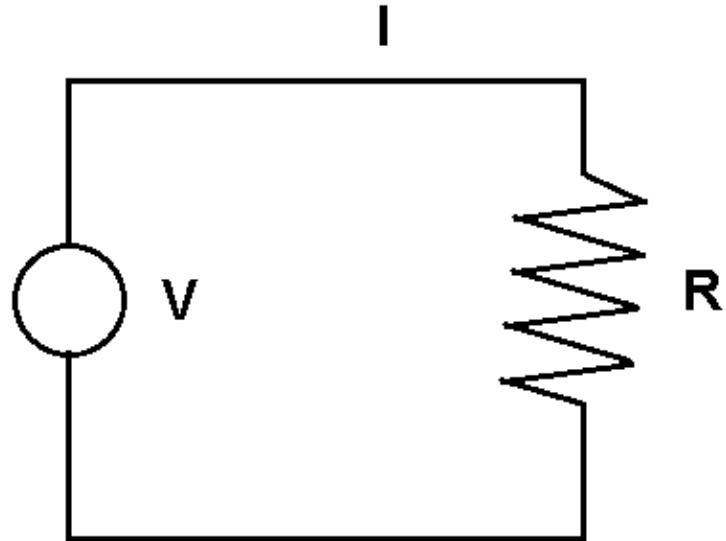
$$\Phi = B * S$$

- S: Área

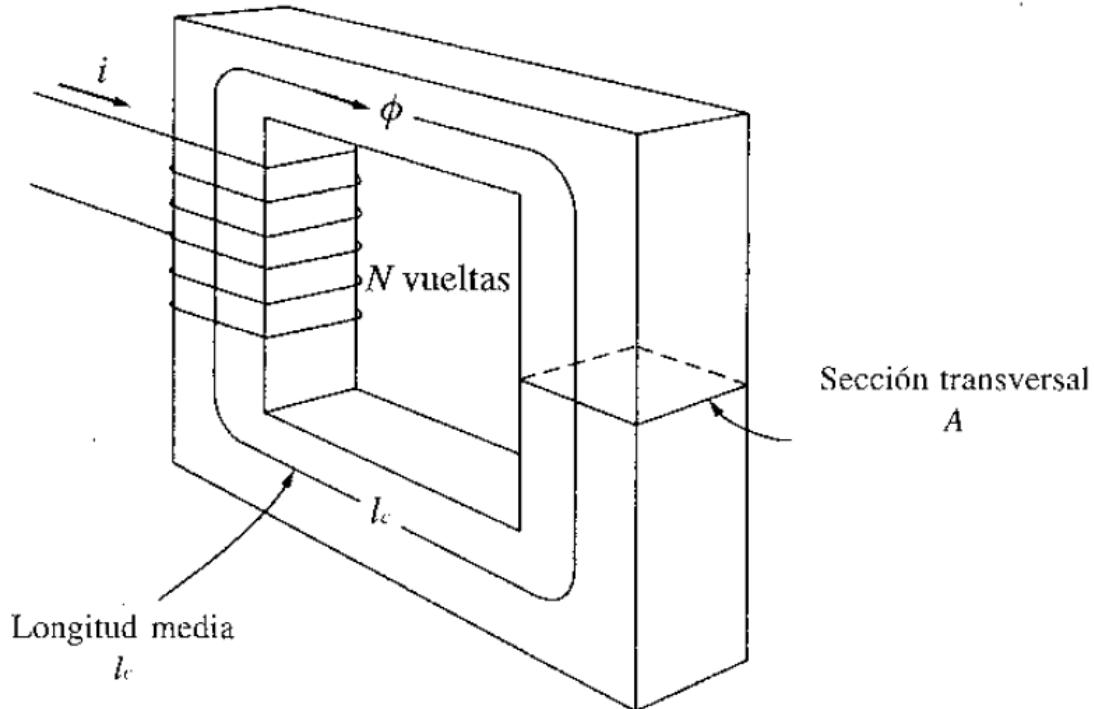
$$\Phi = B * S = \frac{\mu N I S}{l_c}$$



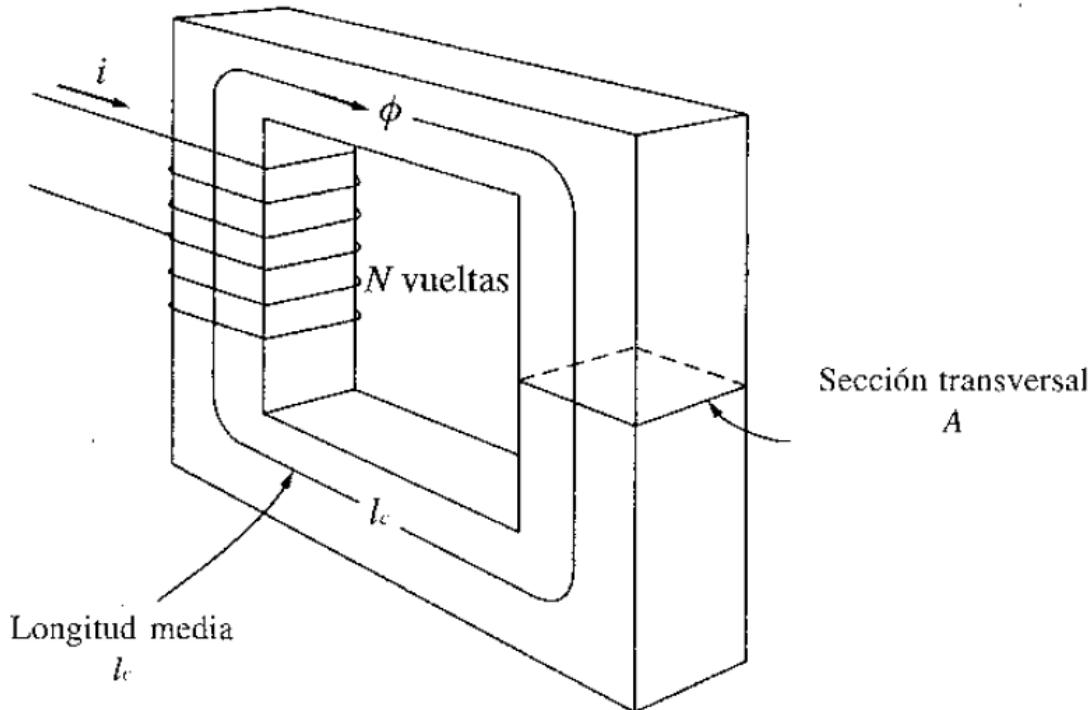
Circuito Magnético



Círculo Magnético



Círculo Magnético



$$\oint H dl = I_{neta}$$

$$H = \frac{NI}{l_c}$$

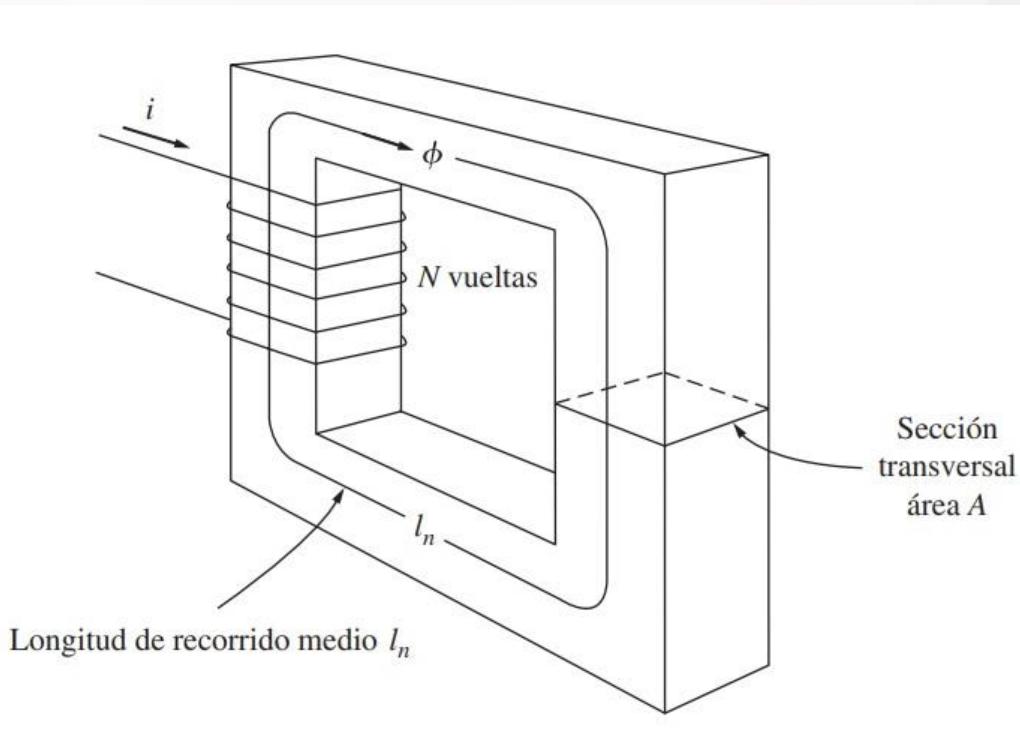
$$B = \mu H$$

$$B = \frac{\mu NI}{l_c}$$

$$\Phi = BA$$

$$\Phi = NI \frac{\mu A}{l_c}$$

Círculo Magnético



$$\Phi = NI \frac{\mu A}{l_c}$$

$$\mathcal{F} = NI$$

$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$

Permeancia Magnética (P)

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}}$$

$$\Phi = \mathcal{F} \frac{\mu A}{l_c}$$

$$\Phi = \mathcal{F} \mathcal{P} \quad \therefore \mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$

Reluctancia Magnética (R)

- Reluctancias en Serie se Suman

$$\mathcal{R}_e = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots + \mathcal{R}_k$$

- Reluctancias en Paralelo

$$\mathcal{R}_e = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \dots + \frac{1}{\mathcal{R}_k}$$

Reluctancia Magnética (R)

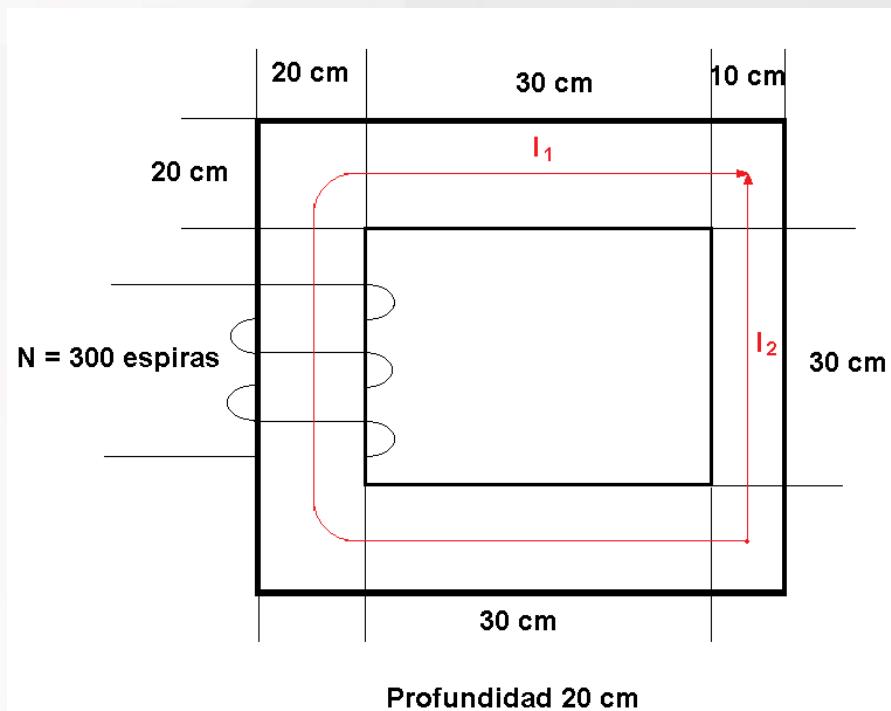
- Los Cálculos de Flujo de los circuitos magnéticos no son exactos, por las siguientes razones:
 - El cálculo de flujo magnético se considera interno en el núcleo y esto no es verdadero
 - la permeabilidad del núcleo ferromagnético es de 2000 a 6000 veces mayor a la permeabilidad del aire
 - Existe flujo fuera del material ferromagnético (Flujo Disperso)

Reluctancia Magnética (R)

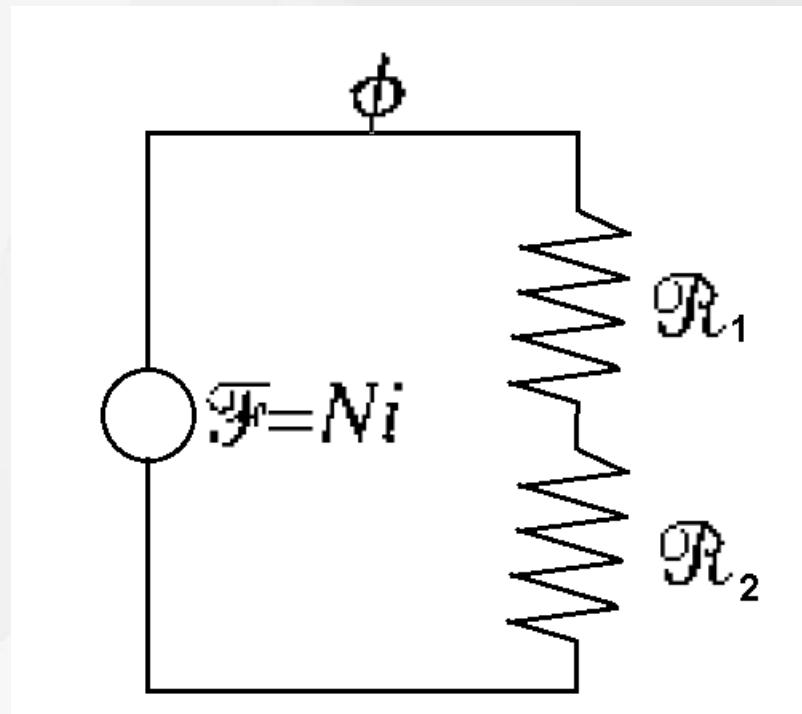
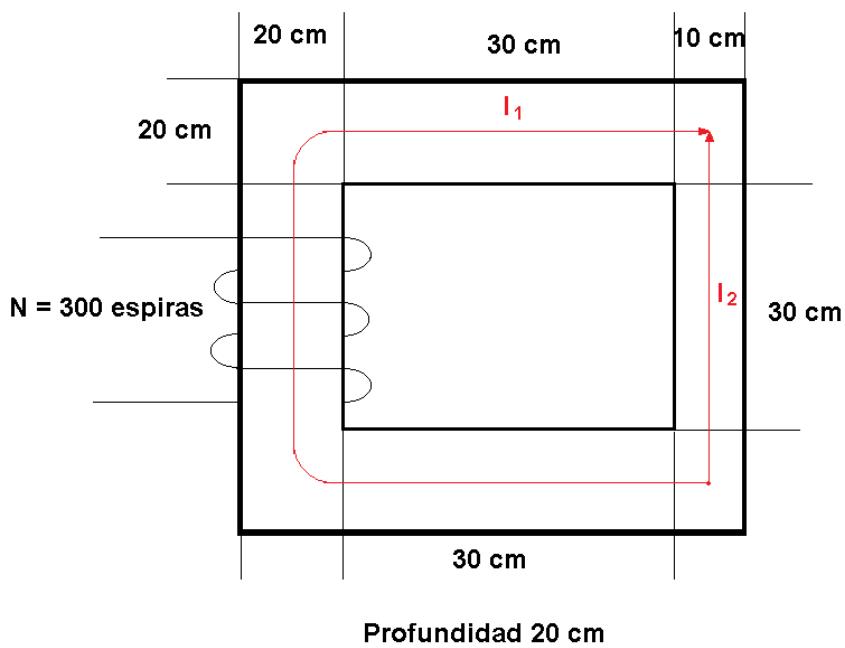
- Los Cálculos de Flujo de los circuitos magnéticos no son exactos, por las siguientes razones:
 - La reluctancia se asume a cierta longitud media (Aproximado)
 - El comportamiento del material ferromagnético no es lineal
 - Existe un efecto marginal cuando aparece entrehierro haciendo mayor el área efectiva.

Ejemplo

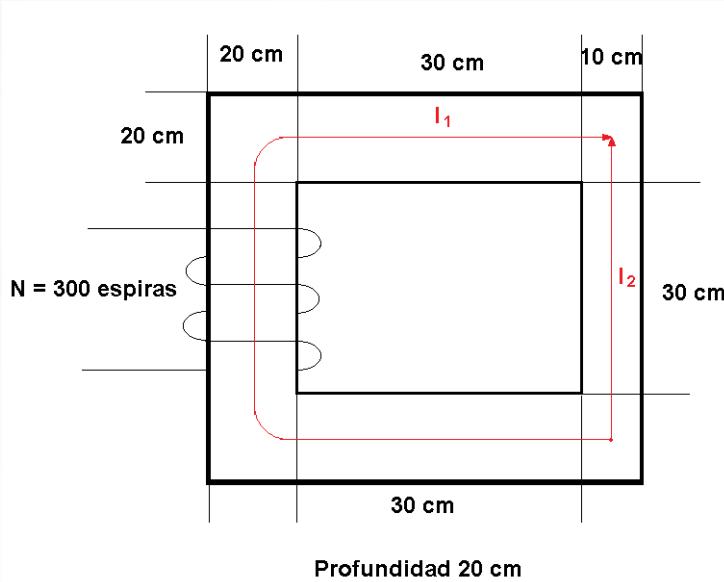
Para el núcleo mostrado en la figura, el cual posee tres lados iguales y el cuarto más delgado. La profundidad del núcleo (hacia el interior de la pagina) es de 20 cm. La bobina consta de 300 espiras y la $\mu_r = 3500$. Cual será el flujo para una Corriente de 2 A.?



Ejemplo (Construcción del Circuito Magnético)



Ejemplo (Cálculo de las Reluctancias)



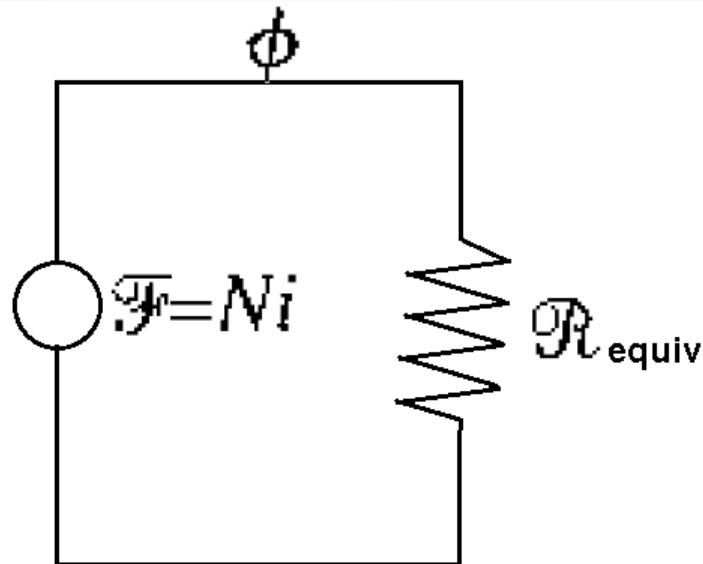
$$R_1 = \frac{(0.30 + 0.30 + 0.30 + 0.20 + 0.20 + 0.10)m}{3500 * 4 * \pi * 10^{-7} * (0.04m^2)}$$

$$R_1 = 7957.7 \quad \text{A-espira/Wb}$$

$$R_2 = \frac{(0.30 + 0.2)m}{3500 * 4 * \pi * 10^{-7} * (0.02m^2)}$$

$$R_2 = 5684.1 \quad \text{A-espira/Wb}$$

Ejemplo (Cálculo de las Reluctancias)

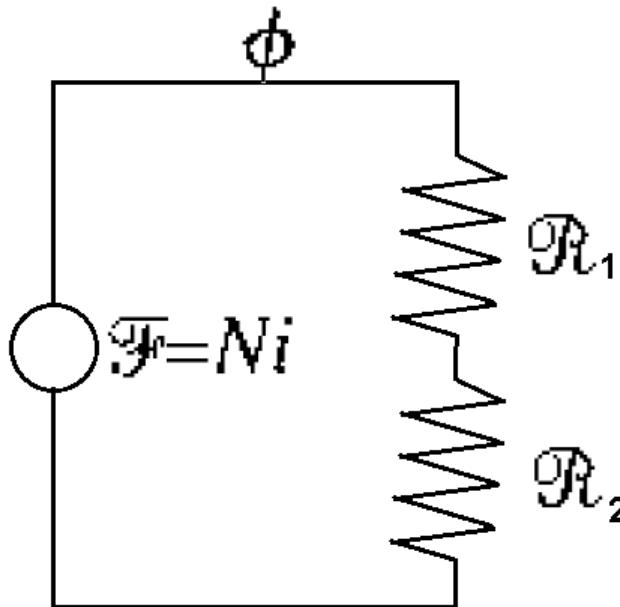


$$\mathcal{R}_{\text{eq}} = R_1 + R_2$$

$$\mathcal{R}_{\text{eq}} = (7957.7 + 5684.1) \text{ A-espira/Wb}$$

$$\mathcal{R}_{\text{eq}} = 13642 \text{ A-espira/Wb}$$

Ejemplo (Cálculo del Flujo)



$$F = NI$$

$$F = 300 \text{ espiras} * 2 \text{ A}$$

$$F = 600 \text{ A - espiras}$$

$$\Phi = \frac{F}{R} = \frac{600 \text{ A - espiras}}{13642 \text{ A - espiras/Wb}}$$

$$\Phi = 0.0440 \text{ Wb}$$

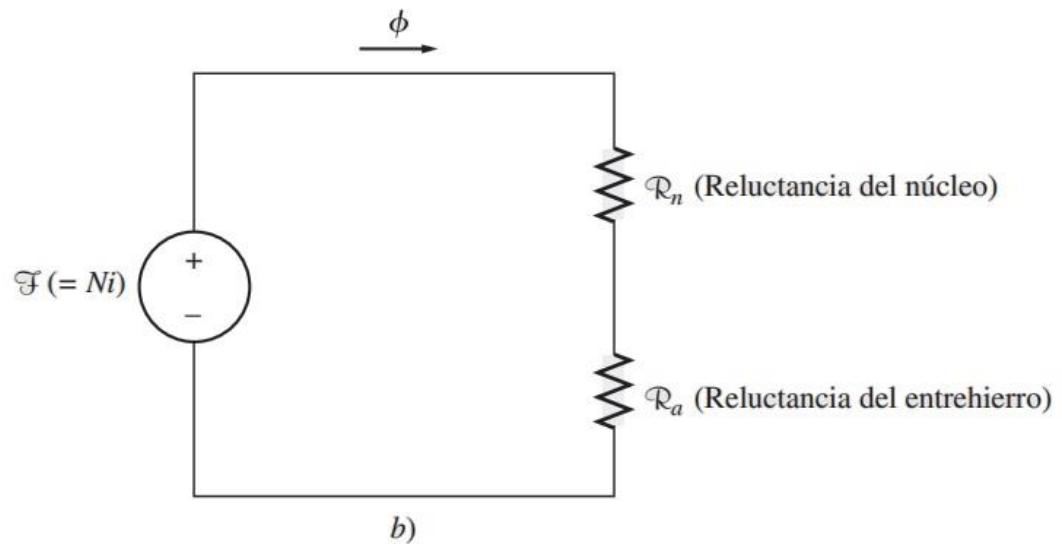
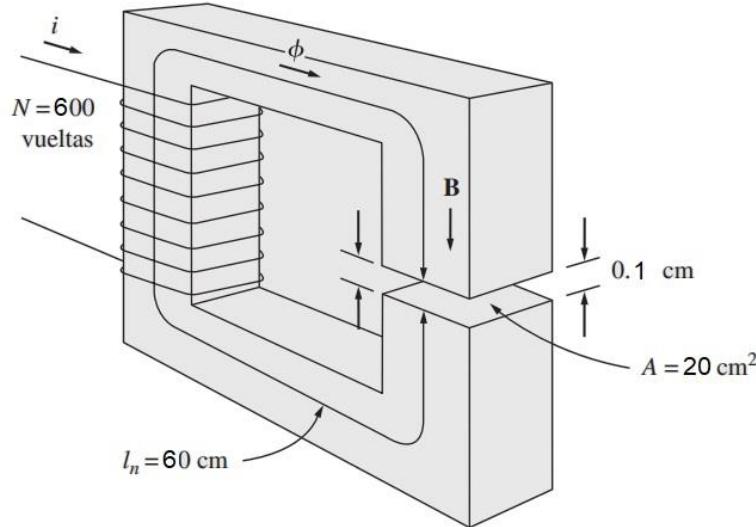
Ejemplo (Usando Matlab)

- %Ejemplo 1.1
- % Datos
- I1=1.4;
- I2=0.5;
- ur=3500;
- u0=4*pi*1e-7;
- A1=0.04;
- A2=0.02;
- N=300;
- I=2;
- %Calculo primera Reluctancia
- R1=I1/ur/u0/A1
- R2=I2/ur/u0/A2
- %Calculo Reluctancia equivalente
- Req=R1+R2
- F=N*I
- Flujo=F/Re

Ejemplo 2

- Para el circuito magnético siguiente con una longitud media de 60 cm. Este material ferromagnético presenta un entrehierro de 0.1 cm. El área efectiva del circuito electromagnético es de 20 cm². El μ_r del núcleo es igual a 6000. La bobina esta construida con 600 Espiras. Asuma un efecto marginal del entrehierro del 10%. Calcule:
- a.- Reluctancia total del circuito
- b.- La corriente necesaria para producir 2 T. en el entrehierro

Ejemplo 2



Ecuación de Motor

- Siempre que circule corriente por un conductor y dicho conductor este siendo atravesado por un campo se producirá en él, una Fuerza.

$$F = I \bullet (l \times B)$$

- F: Fuerza
- I: Corriente
- l: Conducto
- B: Densidad de Campo Magnético

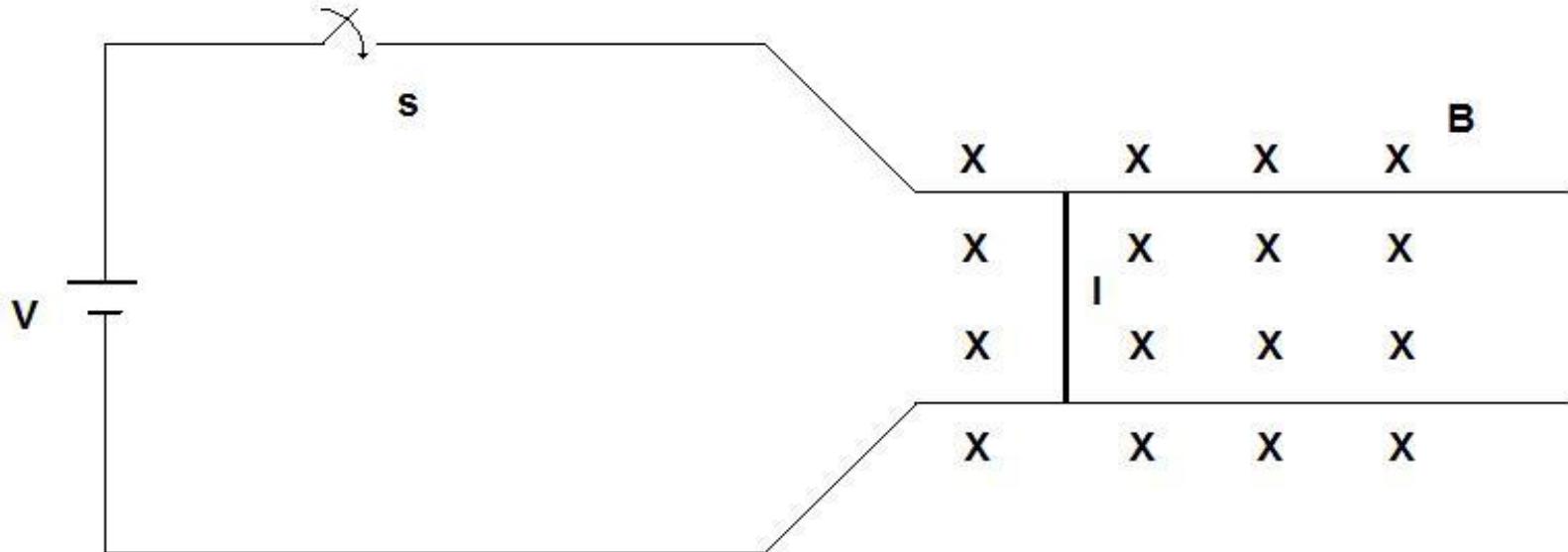
Ecuación de Generador

- Siempre que Exista una diferencia de velocidad entre un conductor y un Campo Magnético, se inducirá en dicho conductor una tensión

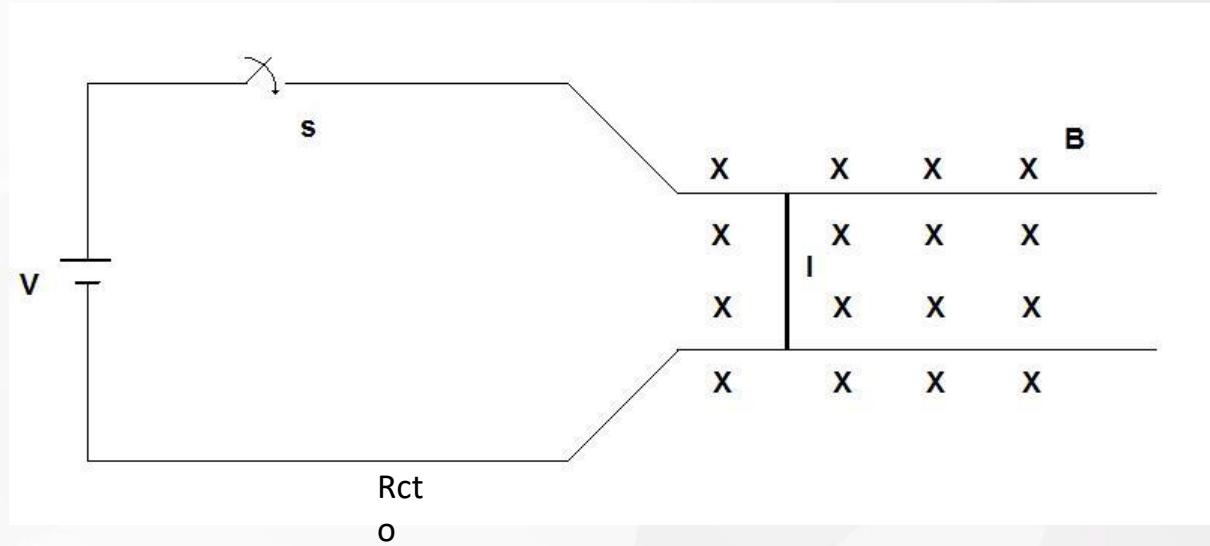
$$e = (v_{rel} \times B) \bullet l \quad \therefore v_{rel} = v_B - v_l$$

- e: Tensión Inducida
- v_{rel} : Velocidad Relativa
- l: Conducto
- B: Densidad de Campo Magnético

Máquina de Corriente Continua Líneaal



Ejemplo



$$V=100 \text{ V}$$

$$l=1.5 \text{ m}$$

$$R_{ct}=0.06 \Omega$$

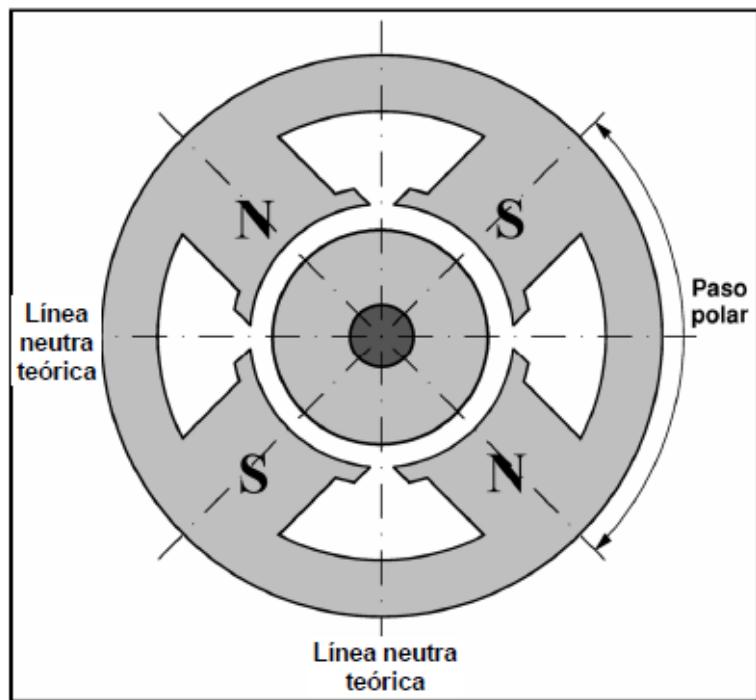
$$B=0.5 \text{ T}$$

Máquinas de Corriente Continua Rotativas

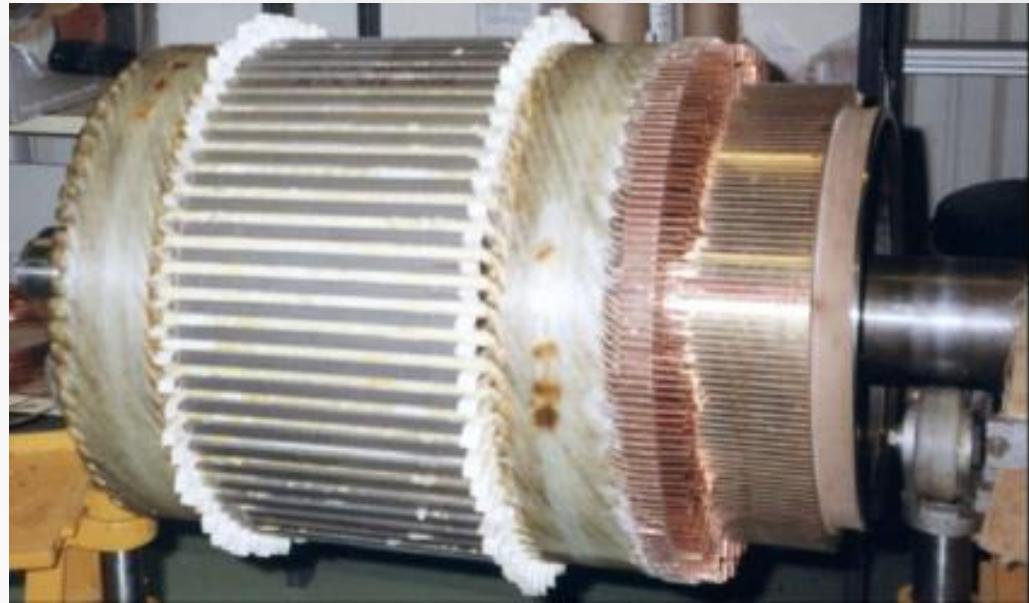
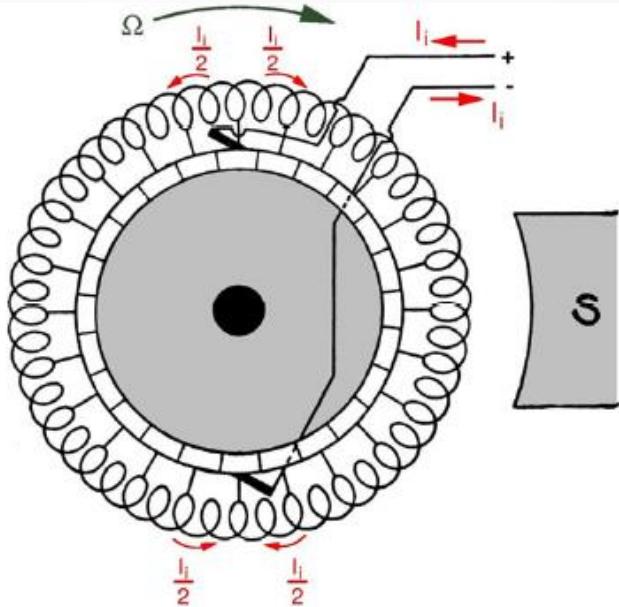
- Estator: Parte fija de la máquina. Allí se aloja el devanado de Campo, el cual es de tipo concentrado y su función principal es la de producir el Campo Magnético. Este devanado puede ser reemplazado por imanes permanentes.

- Rotor: Parte móvil de la máquina. Allí se encuentra el devanado de Armadura (o de Inducido) y su función principal es la de inducir tensión (G) o producir fuerza (M). Este circuito será de alta corriente

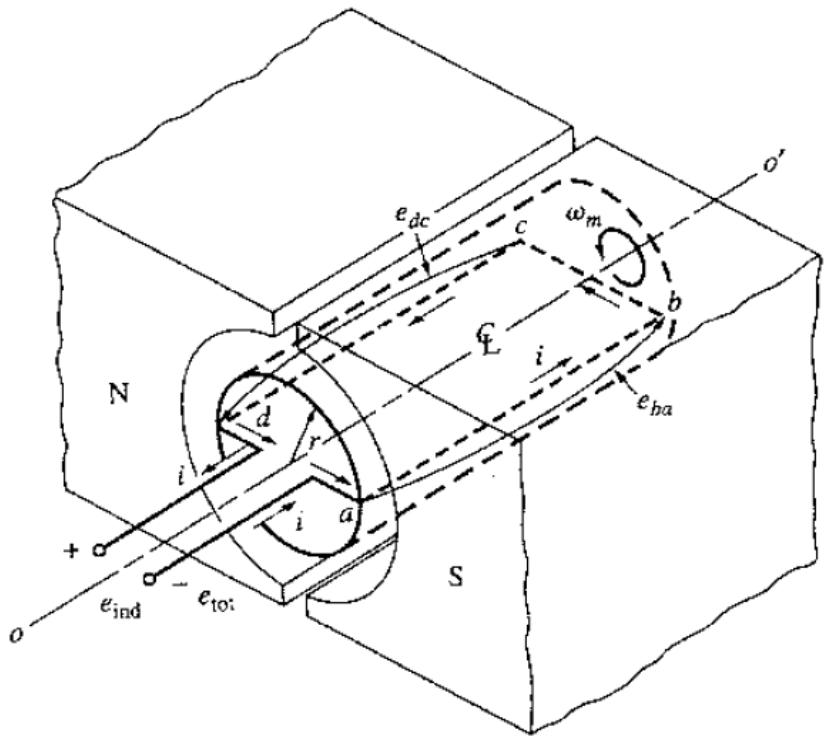
Estator



Rotor



Tensión Inducida en una Espira



$$e_{ind} = e_{ab} + e_{bc} + e_{cd} + e_{da}$$

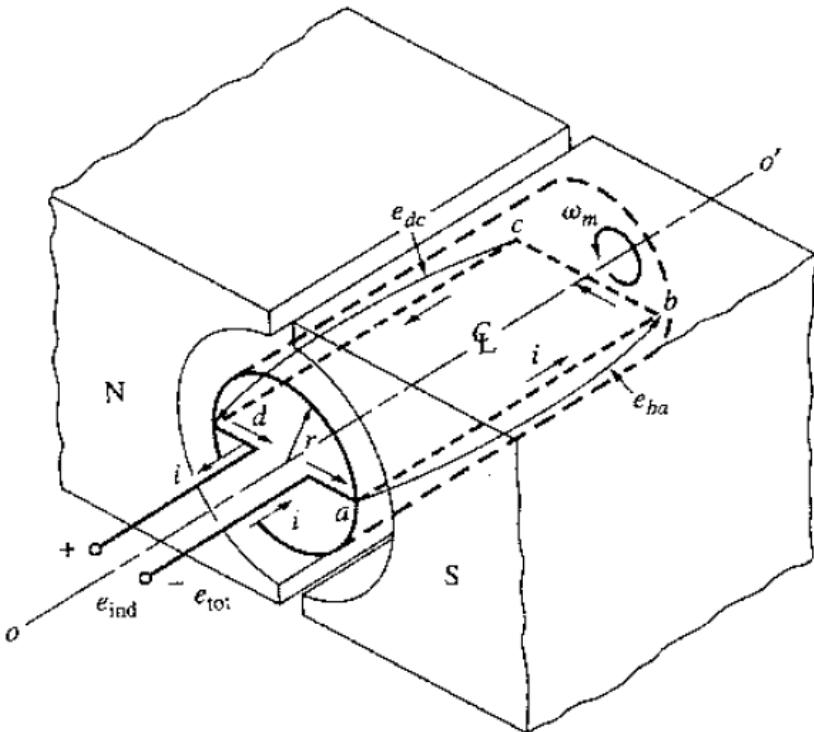
$$\therefore e = (v_{rel} \times B) \bullet l$$

$$v_{rel} = v_B - v_l \quad v_B = 0$$

$$e_{ind} = v_l Bl + 0 + v_l Bl + 0$$

$$e_{ind} = 2v_l Bl$$

Tensión Inducida en una Espira



$$e_{ind} = 2v_l Bl$$

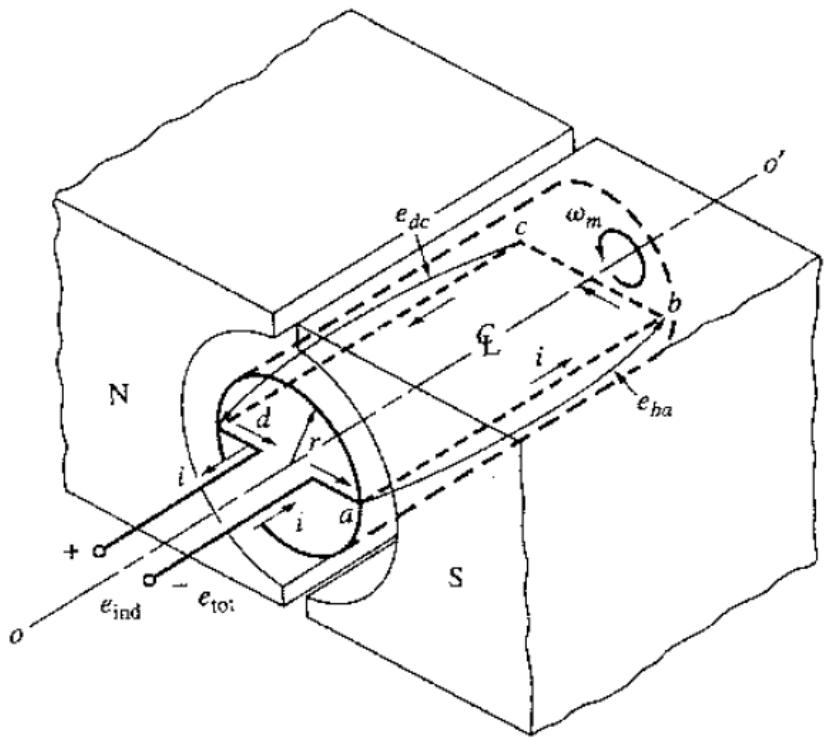
$$A_c = 2\pi rl \quad \text{área de campo} = \frac{A_c}{2} = A$$

$$\Phi = BA$$

$$e_{ind} = \frac{2v_l \Phi l}{\pi r l} \quad \therefore v_l = r\omega_r$$

$$e_{ind} = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r$$

Tensión Inducida en una Espira



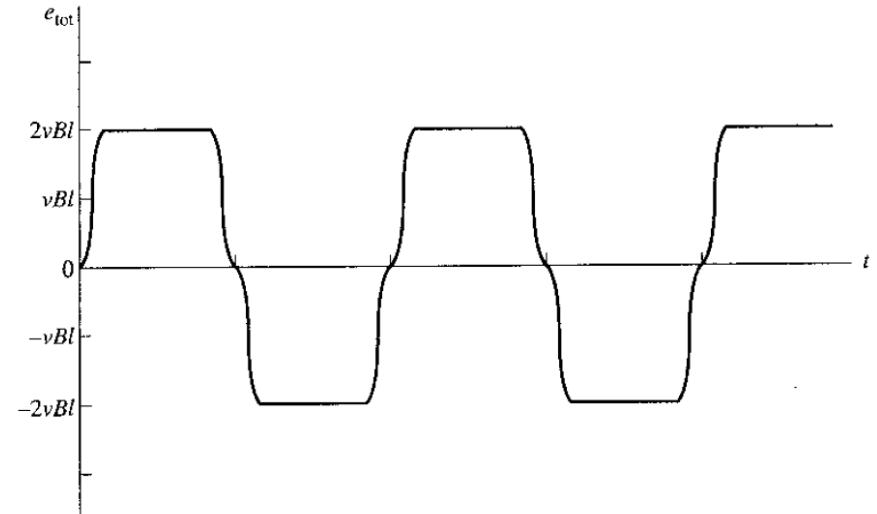
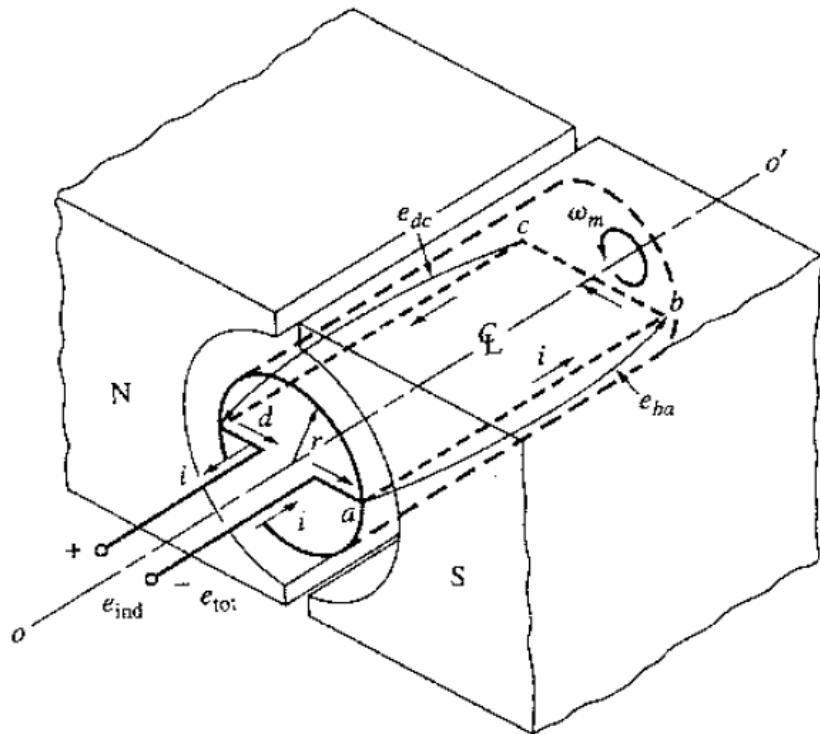
$$e_{ind} = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r$$

$$\therefore \omega_r [rad/s] = 2\pi \frac{n_r [rpm]}{60}$$

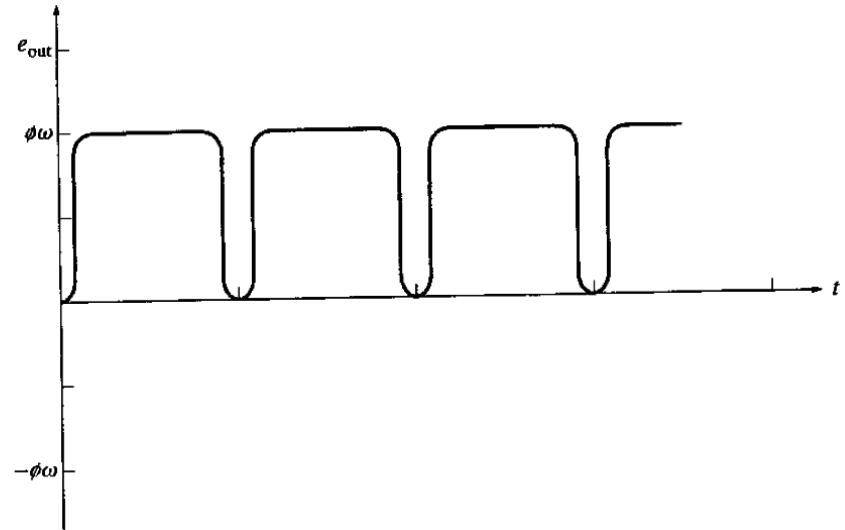
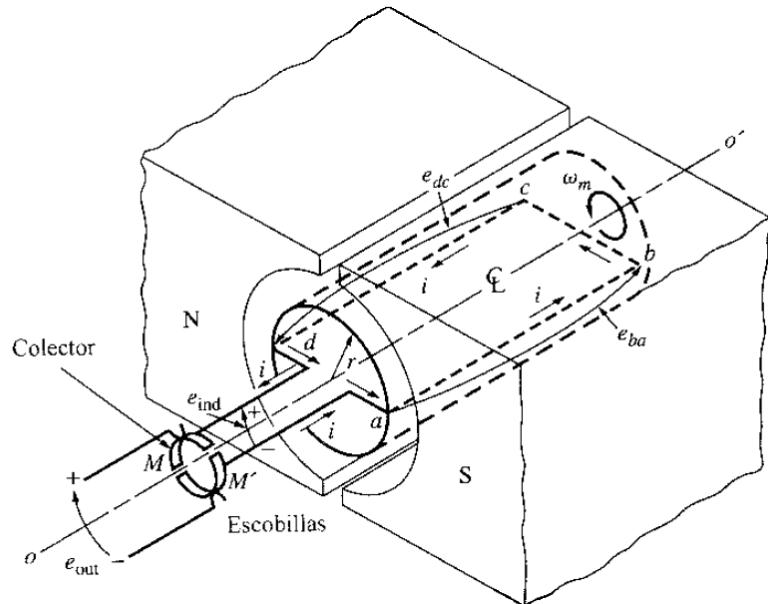
$$e_{ind} = k \Phi \omega_r$$

$$e_{ind} = k \Phi n_r$$

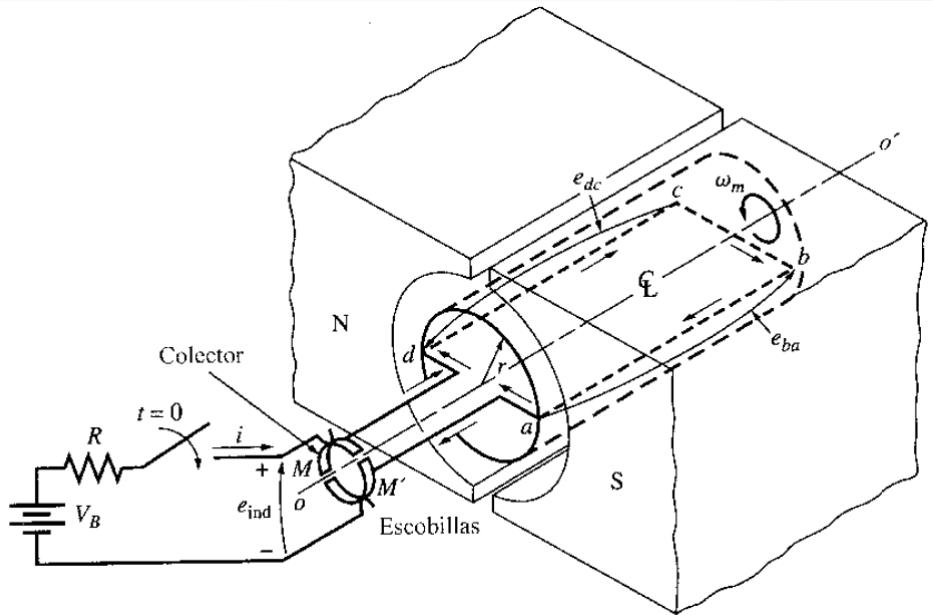
Tensión Inducida en una Espira



Commutación



Fuerza Inducida en una Espira



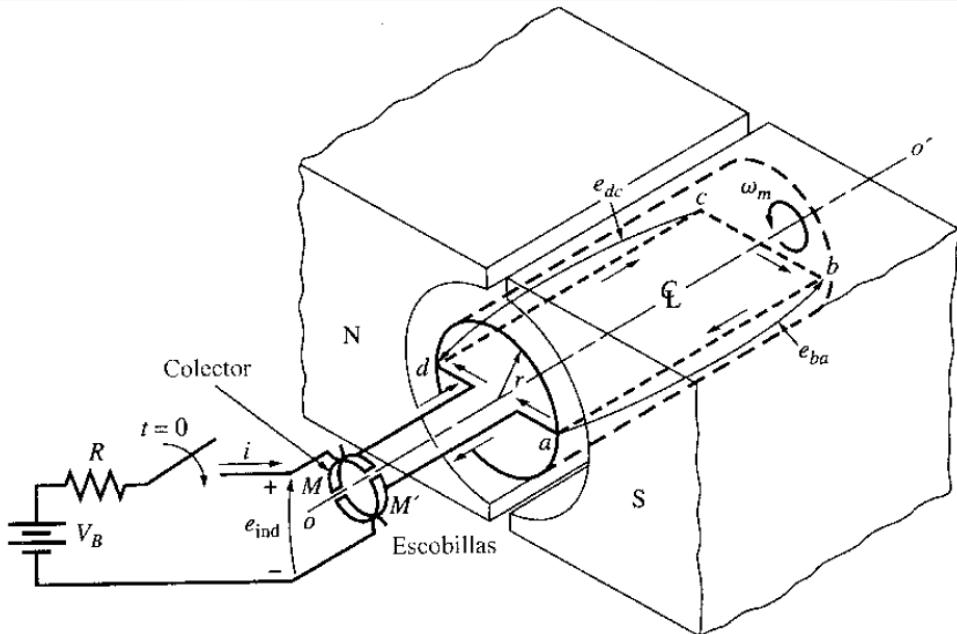
$$F_{ind} = F_{ab} + F_{bc} + F_{cd} + F_{da}$$

$$\therefore F = I \bullet (l \times B)$$

$$F_{ind} = IBl + 0 + IBl + 0$$

$$F_{ind} = 2IBl$$

Fuerza Inducida en una Espira



$$F_{ind} = 2IBl \quad \therefore \Phi = BA$$

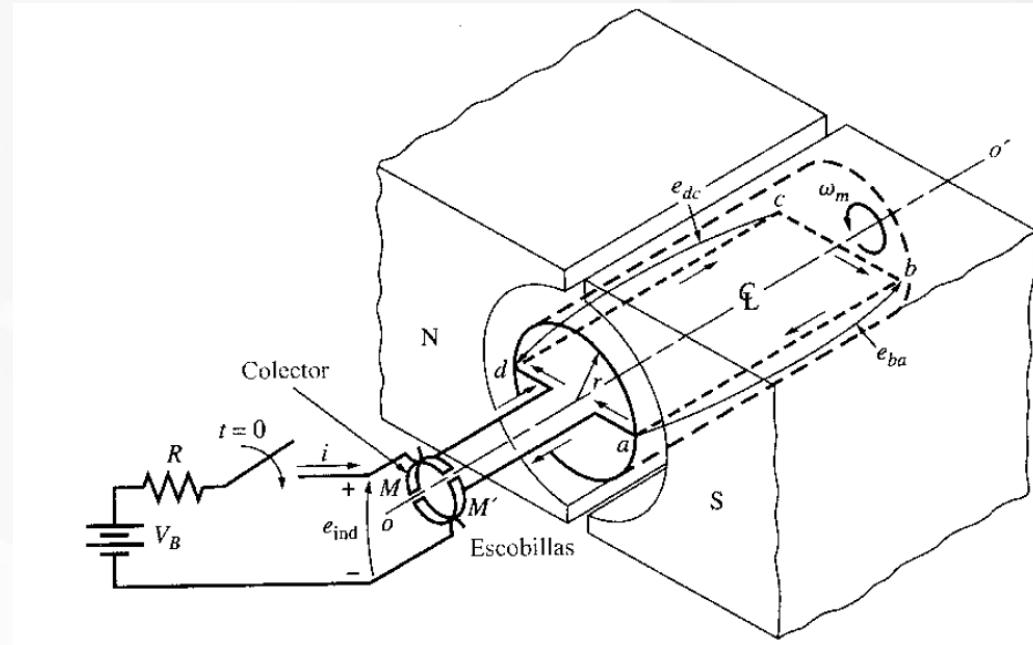
$$F_{ind} = 2I \frac{\Phi}{A} l \quad \therefore A = \pi r l$$

$$F_{ind} = 2I \frac{\Phi}{\pi r l} l \quad T_e = Fr$$

$$T_e = \frac{2}{\pi} \Phi I$$

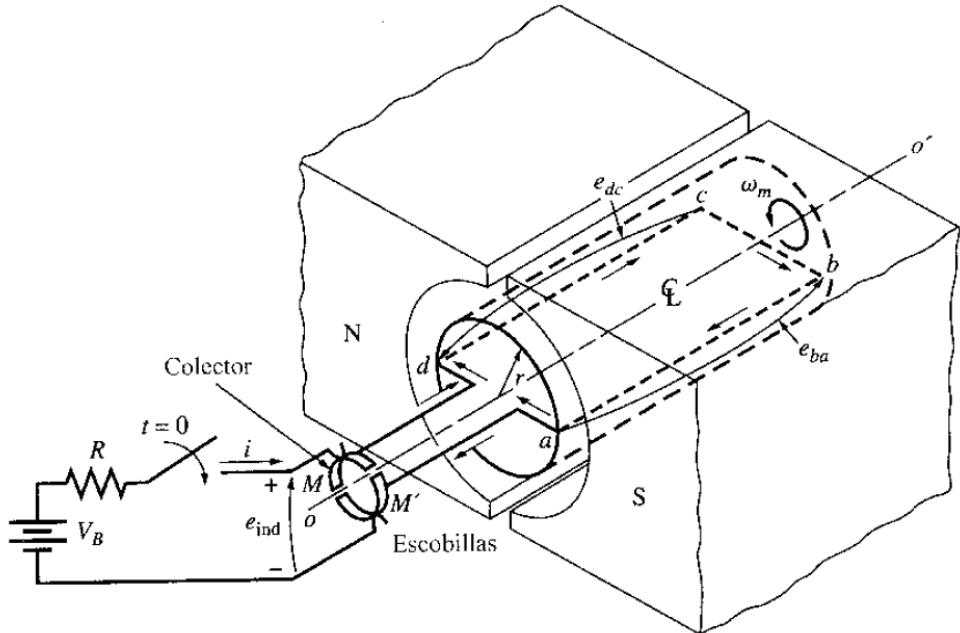
Ejemplo

- Para el circuito de Figura:
- $R=0,3 \Omega$ $l=1 \text{ m}$ $r=0,5 \text{ m}$ $B=0.25 \text{ T}$ $V_B = 120\text{V}$



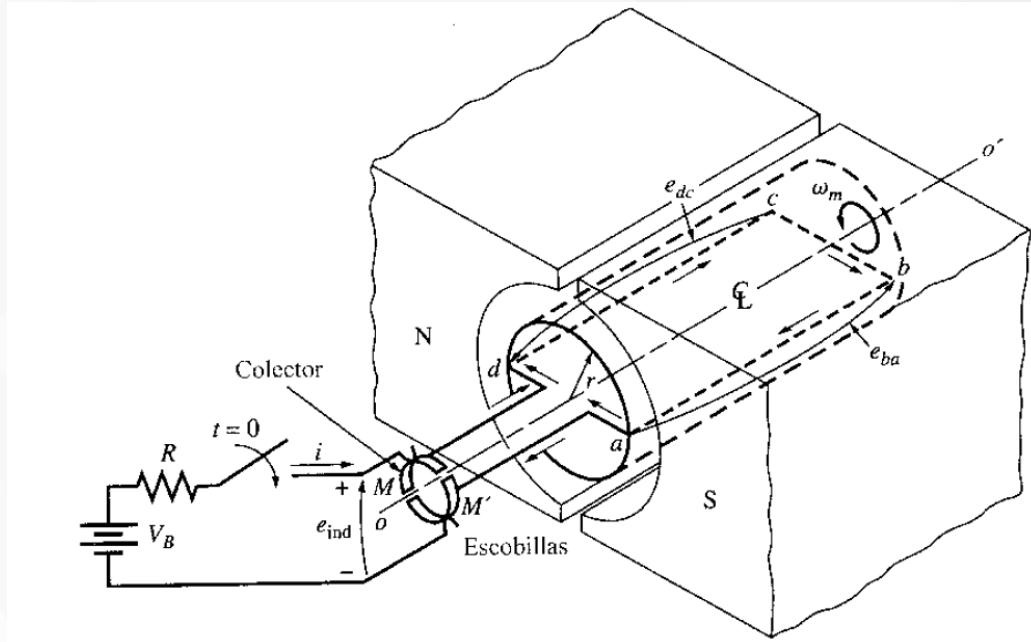
Ejemplo

- Responda: Que ocurre cuando se cierra el Interruptor?



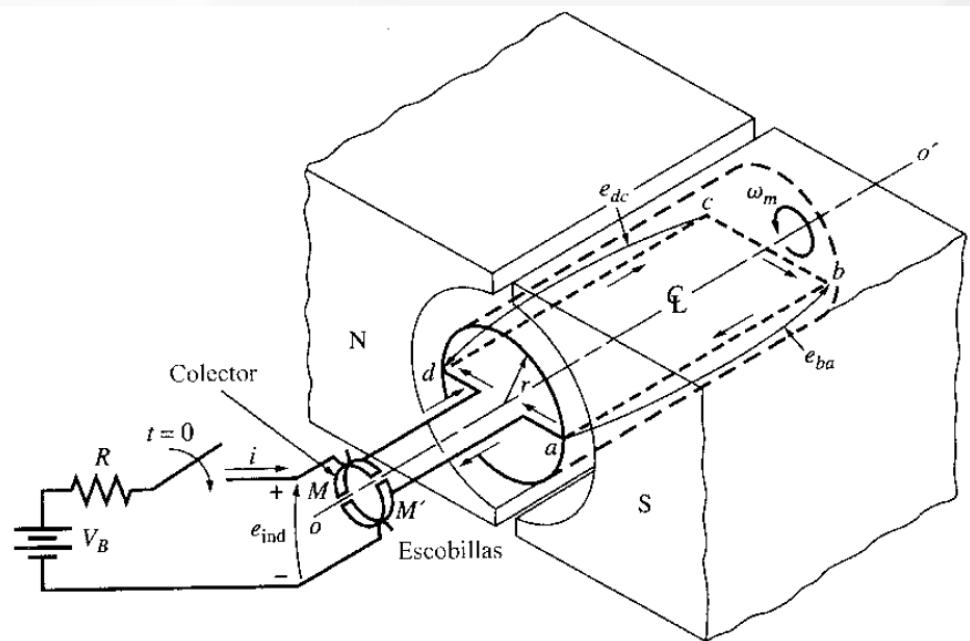
Ejemplo

- Calcule: La Corriente de Arranque I'_{arrq}



Ejemplo

- Calcule: La Corriente de Arranque I'_{arrq}



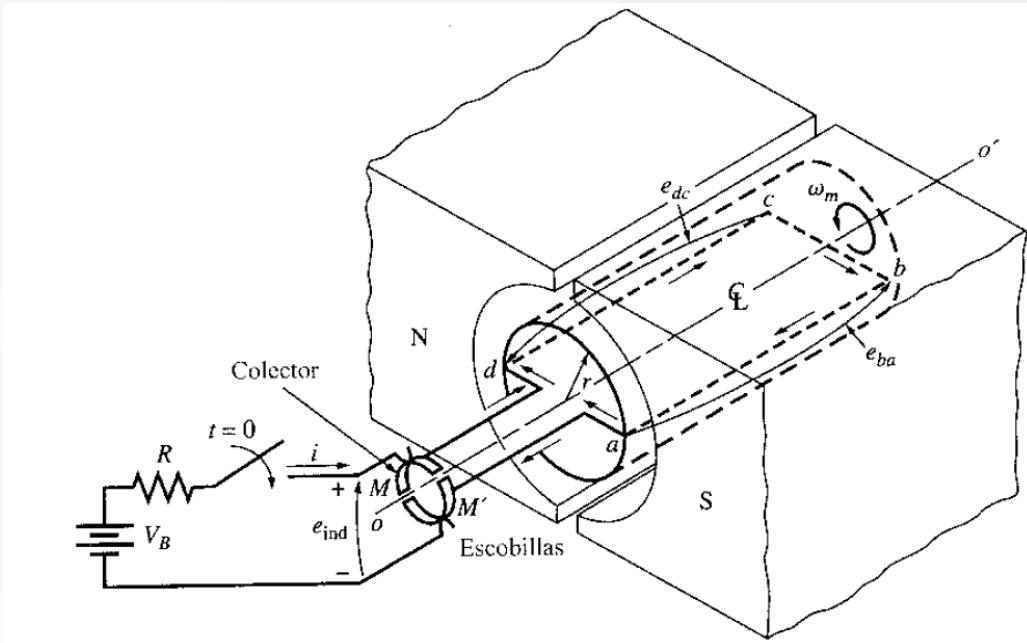
$$I'_{arrq} = \frac{V_B - e_c}{R}$$

$$I'_{arrq} = \frac{120V}{0.3\Omega}$$

$$I'_{arrq} = 400A$$

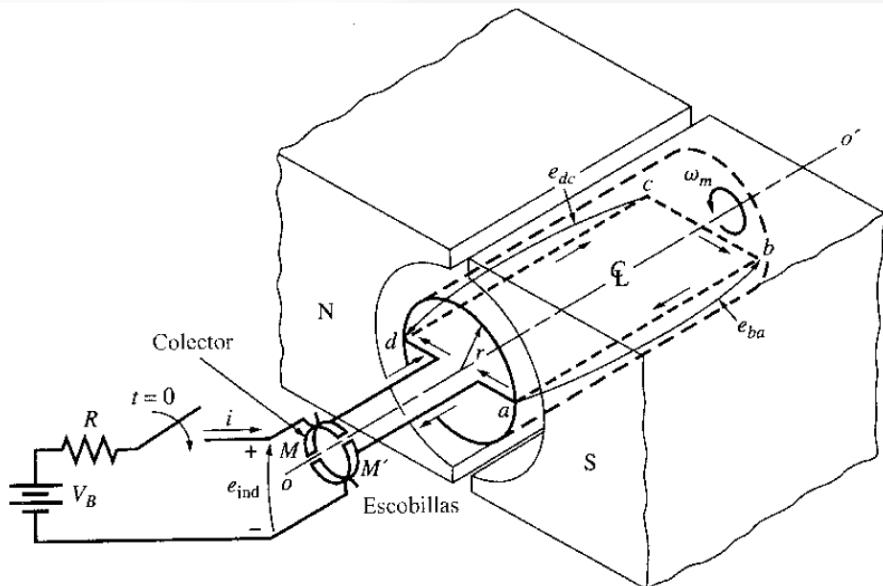
Ejemplo

- Calcule: La velocidad de vacío en régimen permanente (ω_{r0})



Ejemplo

- Calcule: La velocidad de vacío en régimen permanente (ω_{r0})



$$e_c = V_B \quad \text{En regimen permanente}$$

$$e_c = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r \quad \therefore \Phi = BA$$

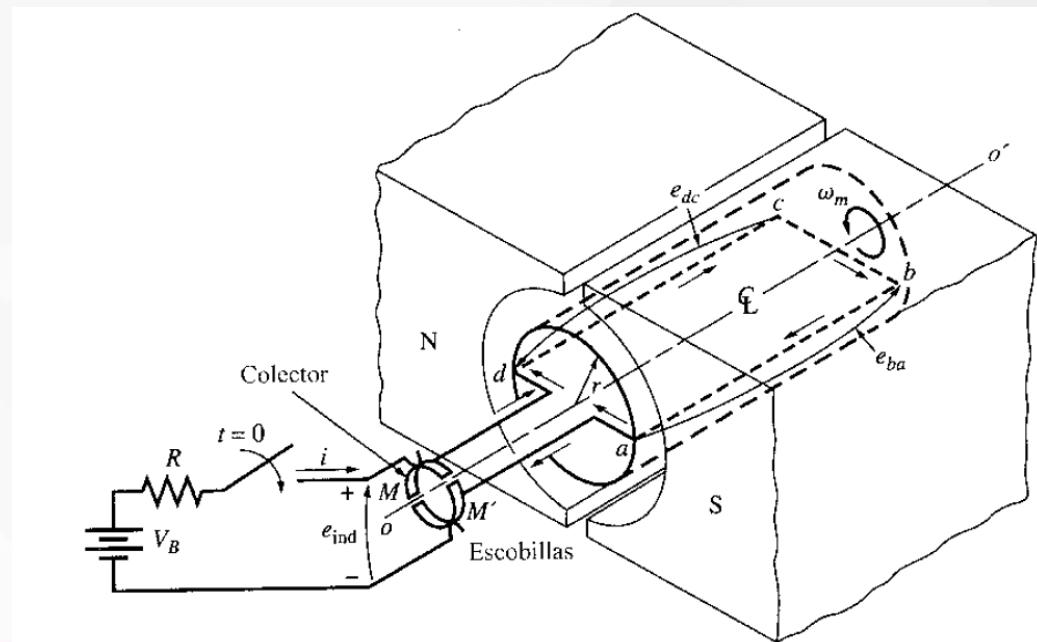
$$\Phi = B \pi r l = (0.25T) \pi (0.5m) (1m)$$

$$\Phi = 0.125\pi Wb$$

$$\omega_r = \frac{e_c \pi}{2\Phi} = \frac{120V\pi}{2(0.125\pi Wb)} = 480 rad / s$$

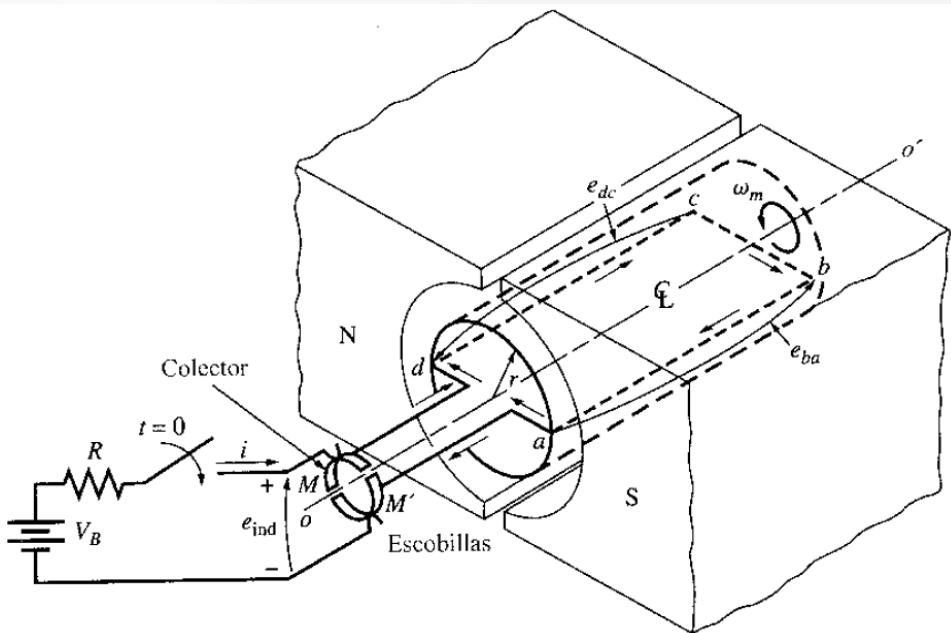
Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 10 N-m a la espira, determine, (ω_{rf}) PM (Potencia en el eje), PE (Potencia de Entrada)



Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 10 N·m a la espira, determine, (ω_{rf}) PM (Potencia en el eje), PE (Potencia de Entrada)



$$T_e = \frac{2}{\pi} \Phi I \quad \Phi = BA$$

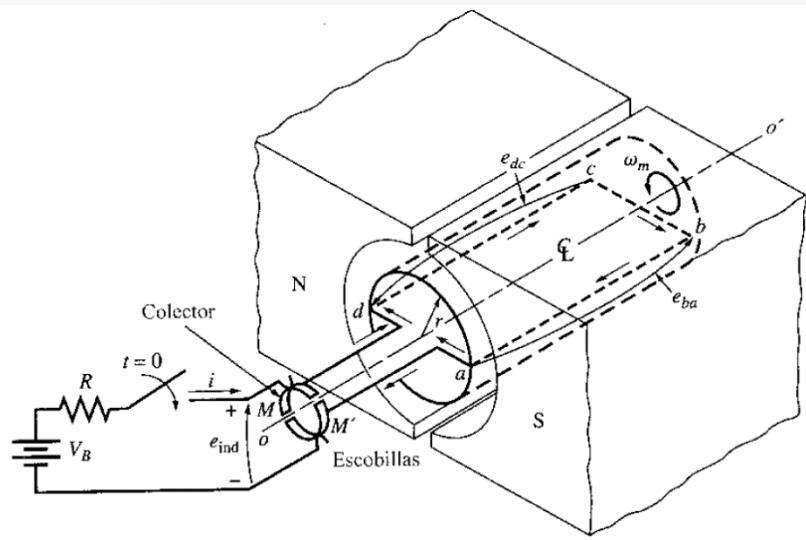
$$I = \frac{T_e \pi}{2(0.25T)(\pi r l)}$$

$$I = \frac{10N - m\pi}{2\pi(0.25T)(0.5m)(1m)}$$

$$I = 40A$$

Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 10 N-m a la espira, determine, (ω_{rf}) PM (Potencia en el eje), PE (Potencia de Entrada)



$$I_f = \frac{V_B - e_c}{R}$$

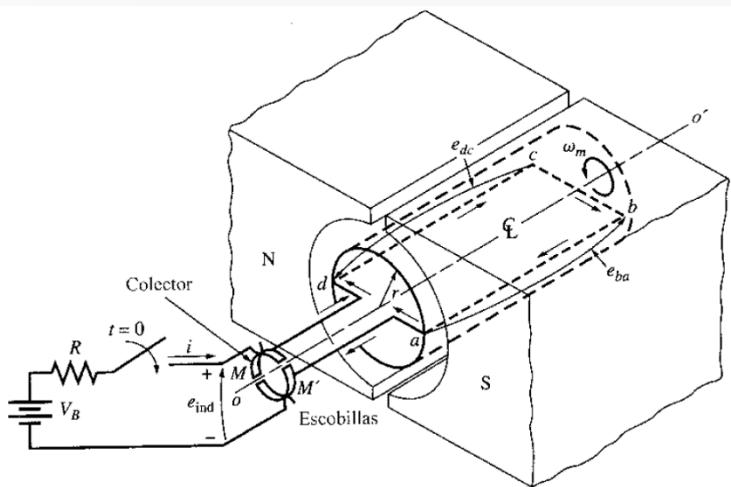
$$e_c = V_B - I_f R$$

$$e_c = 120V - (40A)(0.3\Omega)$$

$$e_c = 108V$$

Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 10 N-m a la espira, determine, (ω_{rf}) PM (Potencia en el eje), PE (Potencia de Entrada)



$$e_c = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r \therefore \Phi = BA$$

$$B = 0.25T \quad A = \pi r l$$

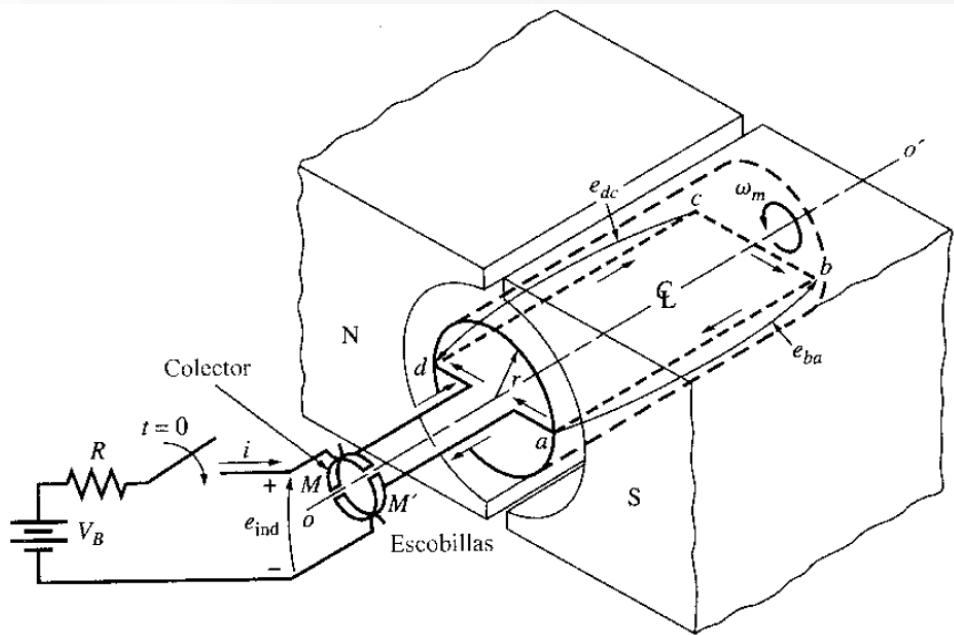
$$\omega_r = \frac{e_c \pi}{2\Phi}$$

$$\omega_r = \frac{108V\pi}{2(0.25T)\pi(0.5m)(1m)}$$

$$\omega_r = 432 \text{ rad/s}$$

Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 10 N-m a la espira, determine, (ω_{rf}) PM (Potencia en el eje), PE (Potencia de Entrada)



$$PM = T_e \omega_r$$

$$PM = (10N \cdot m)(432rad / s)$$

$$PM = 4320W$$

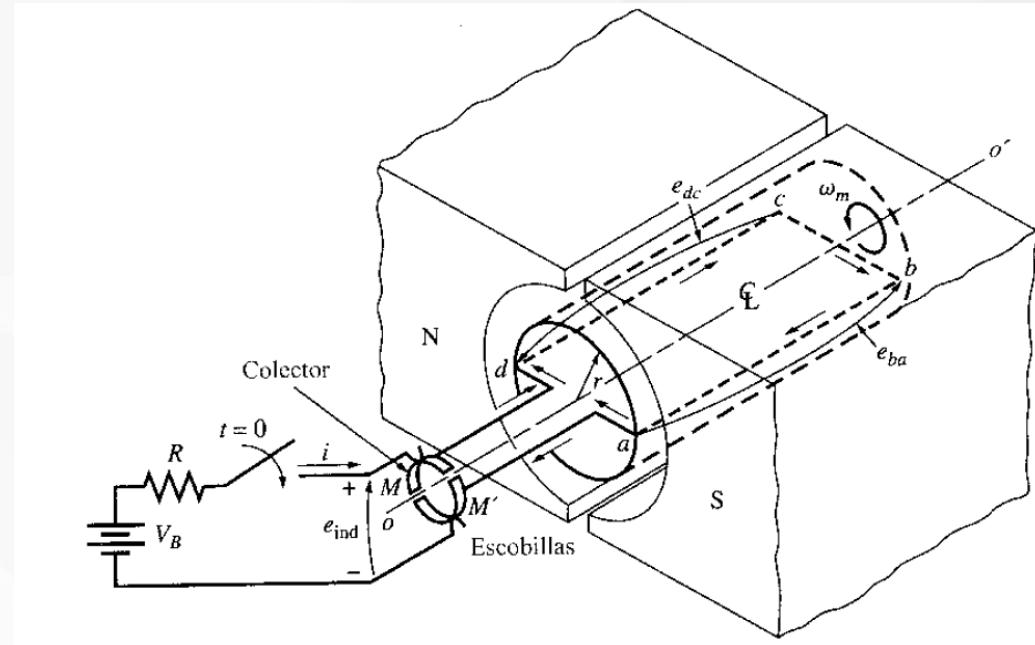
$$PE = V_B I$$

$$PE = (120V)(40A)$$

$$PE = 4800W$$

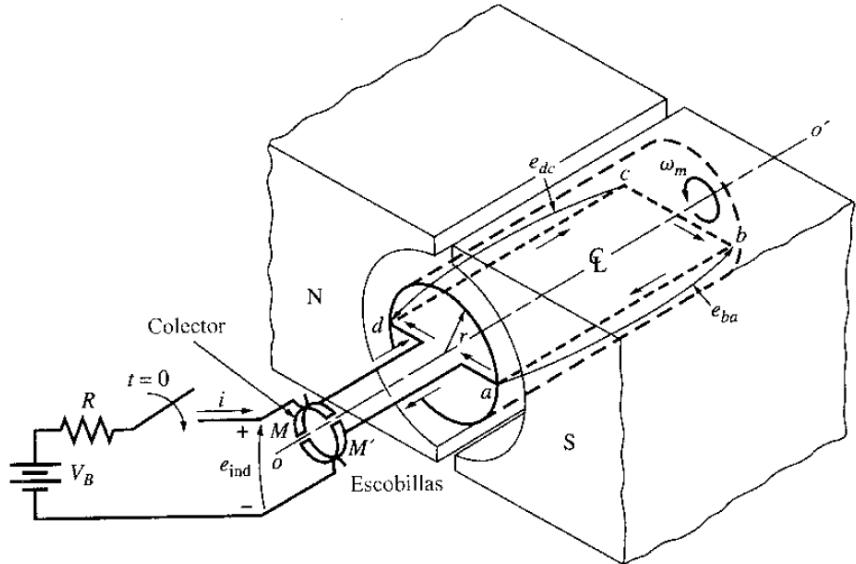
Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 7,5 N·m a la espira, en sentido de la rotación, determine, (ω_{rf}) es un motor o un generador??



Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 7,5 N-m a la espira, en sentido de la rotación, determine, (ω_{rf}) es un motor o un generador??



$$T_e = \frac{2}{\pi} \Phi I \quad \Phi = BA$$

$$I = \frac{T_e \pi}{2(0.25T)(\pi r l)}$$

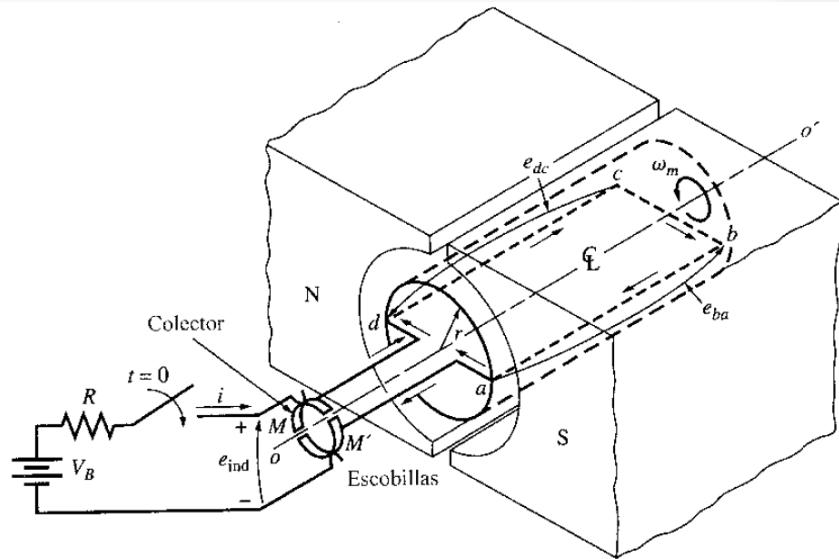
$$I = \frac{7.5N - m\pi}{2\pi(0.25T)(0.5m)(1m)}$$

$$I = 30A$$

Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 7,5 N·m a la espira, en sentido de la rotación, determine, (ω_{rf}) es un motor o un generador??

(Cambio de sentido de I)



$$I_f = \frac{e_c - V_B}{R}$$

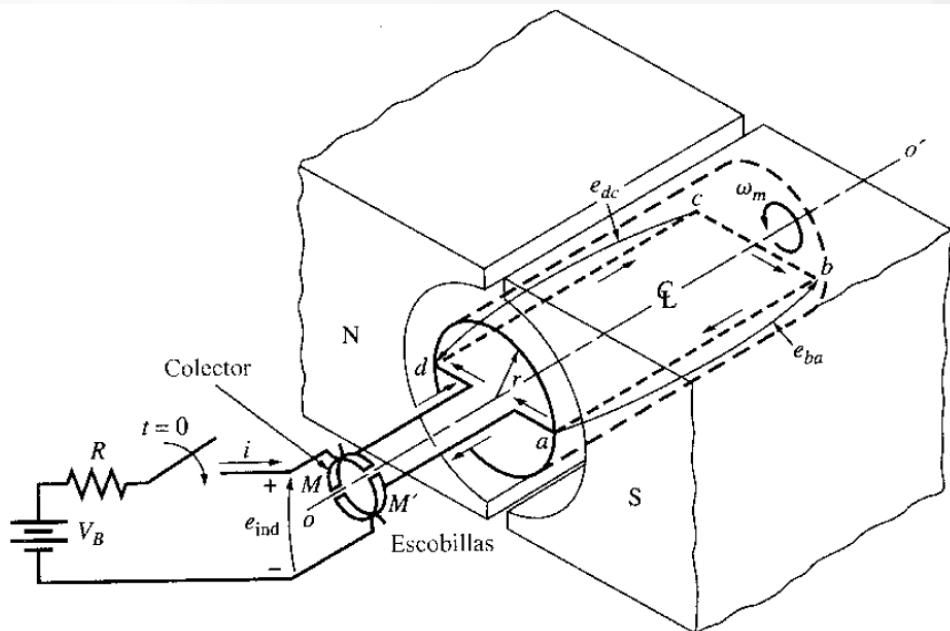
$$e_c = V_B + I_f R$$

$$e_c = 120V + (30A)(0.3\Omega)$$

$$e_c = 129V$$

Ejemplo

- Calcule: Se aplica una carga de 7,5 N·m a la espira, en sentido de la rotación, determine, (ω_{rf}) es un motor o un generador??



$$e_c = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r \therefore \Phi = BA$$

$$B = 0.25T \quad A = \pi r l$$

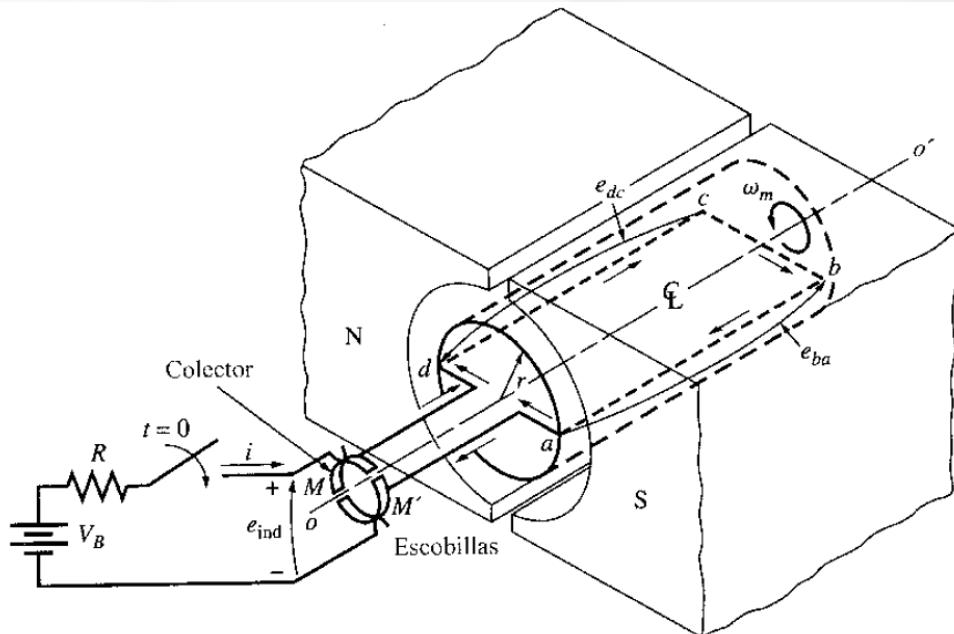
$$\omega_r = \frac{e_c \pi}{2\Phi}$$

$$\omega_r = \frac{129V\pi}{2(0.25T)\pi(0.5m)(1m)}$$

$$\omega_r = 516 \text{ rad/s}$$

Ejemplo

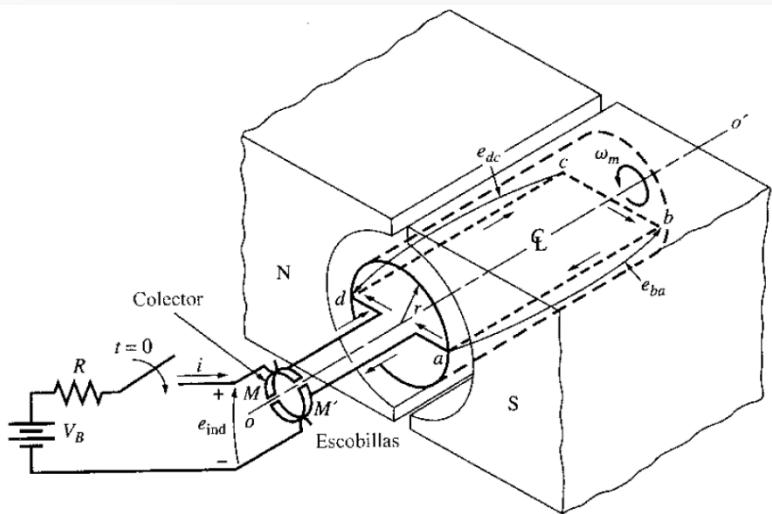
- Calcule: Suponga que la máquina esta descargada (Vacío) y se disminuye su Campo B a 0,2T. Determine la nueva ω_{r0}



Ejemplo

- Calcule: Suponga que la máquina esta descargada (Vacío) y se disminuye su Campo B a 2T. Determine la nueva ω_{r0}

$$e_c = V_B \quad \text{En regimen permanente}$$



$$e_c = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_r \quad \therefore \Phi = BA$$

$$\Phi = B \pi r l = (0.2T) \pi (0.5m) (1m)$$

$$\Phi = 0.1\pi Wb$$

$$\omega_r = \frac{e_c \pi}{2\Phi} = \frac{120V\pi}{2(0.1\pi Wb)} = 600 rad / s$$

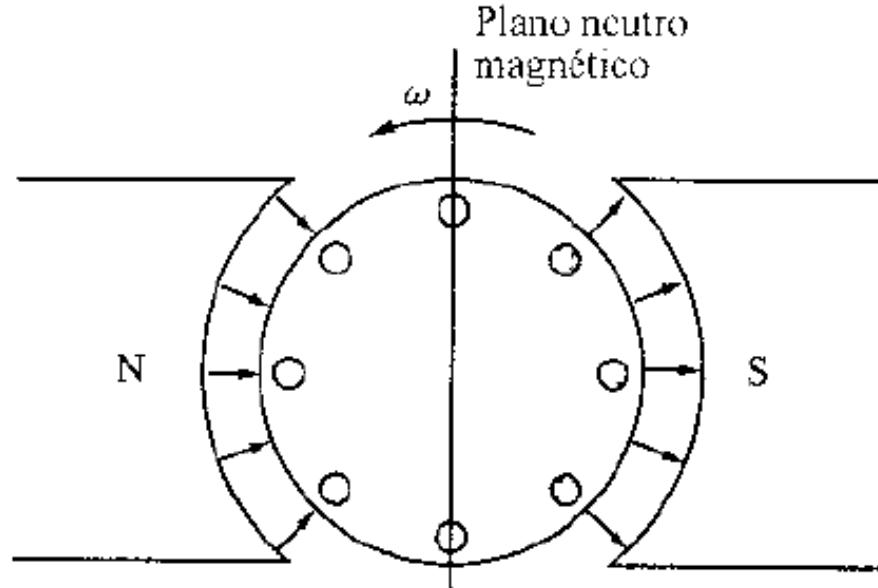
Problemas asociados a la Conmutación

- La conmutación aún cuando parece un procedimiento tranquilo que garantiza que dicha conmutación se haga en la Zona Neutra Geométrica (ZNG), en la realidad esto no es así y existen dos problemas básicos en el proceso de la Conmutación:
 - 1.- Reacción de Inducido
 - 2.- Voltajes $L \frac{di}{dt}$

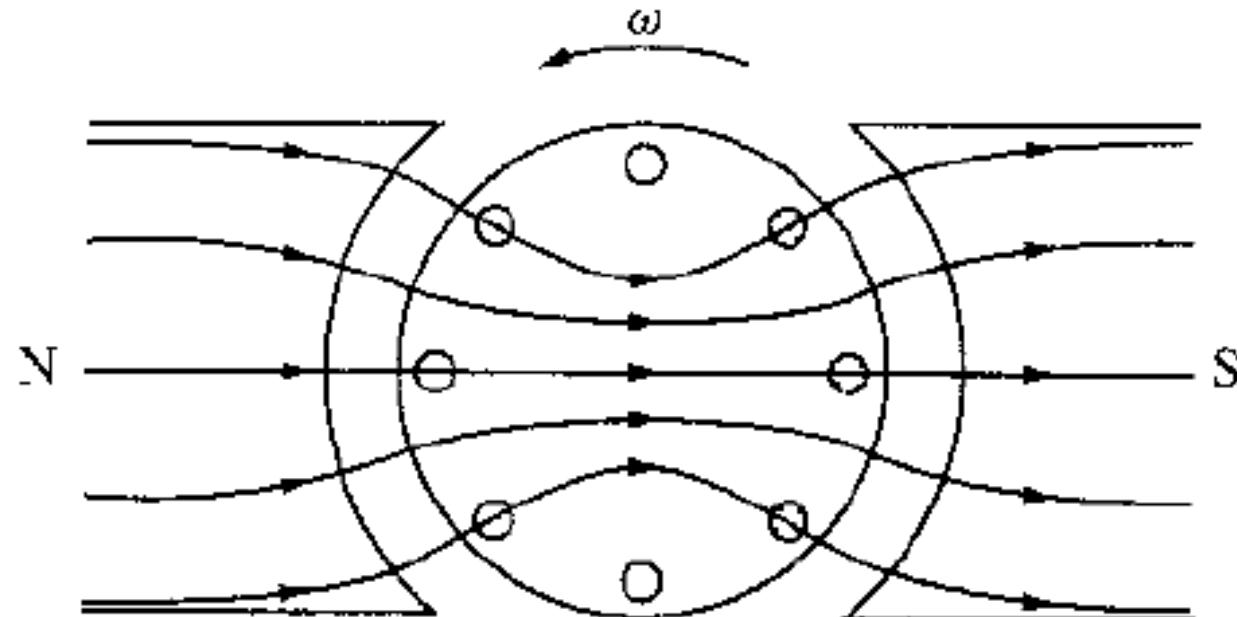
Reacción de Inducido (o de Armadura)

- la Reacción de Armadura o de Inducido sucede en todas las máquinas y consiste en el proceso de pasar de vacío a carga.
- Este procedimiento, en una máquina de Corriente Continua conlleva dos problemas:
 - Desplazamiento de la Zona Neutra Geométrica (Este problema ocasiona chisporroteo)
 - Debilitamiento del Campo

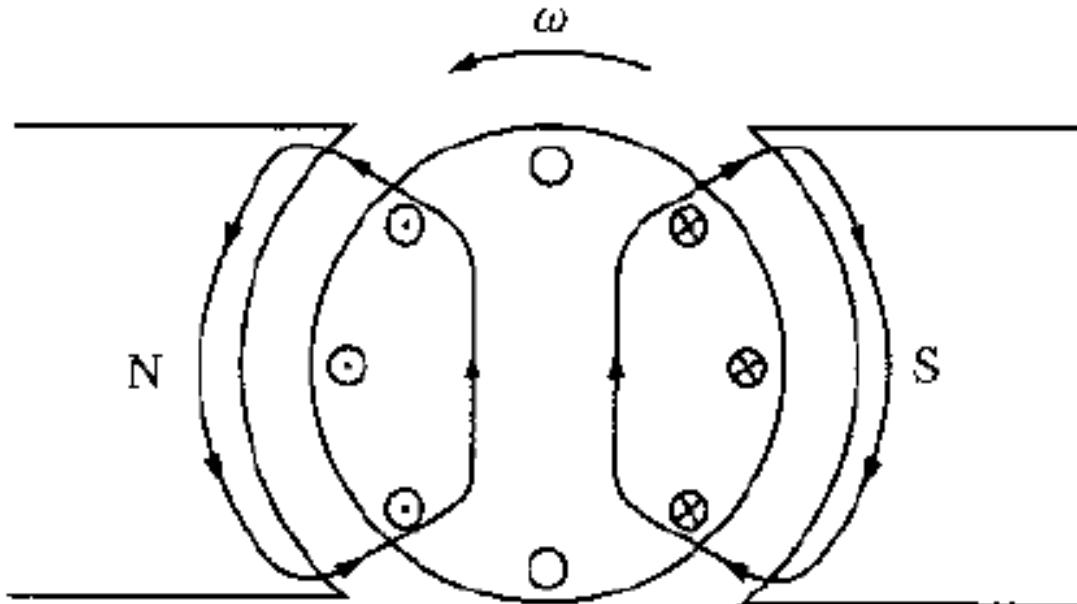
Reacción de Inducido (o de Armadura)



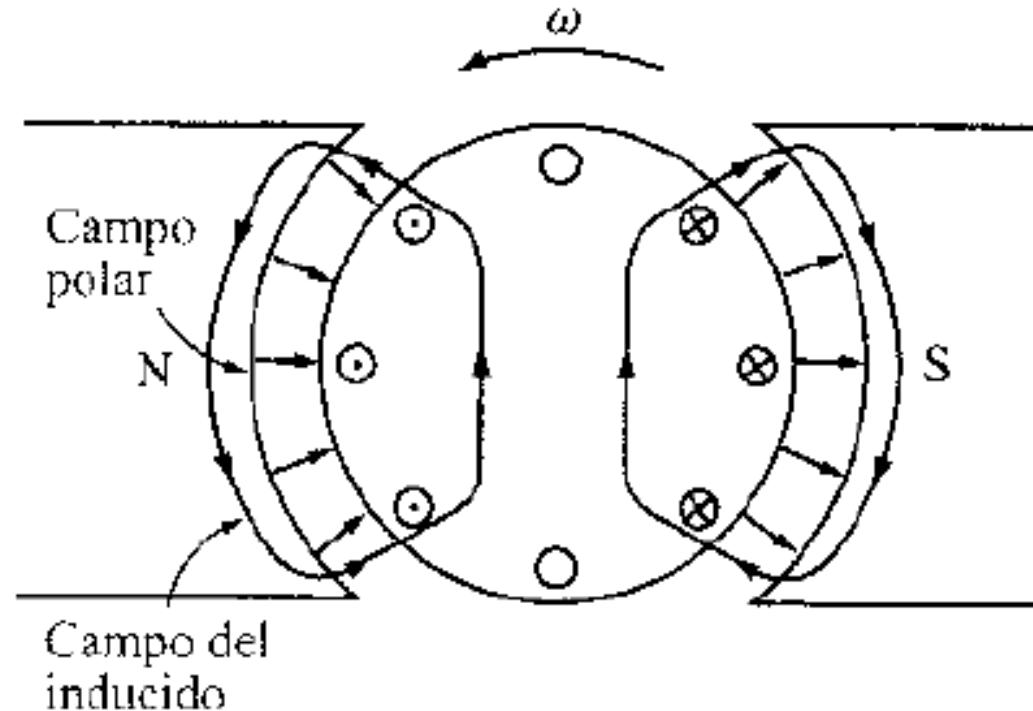
Reacción de Inducido (o de Armadura)



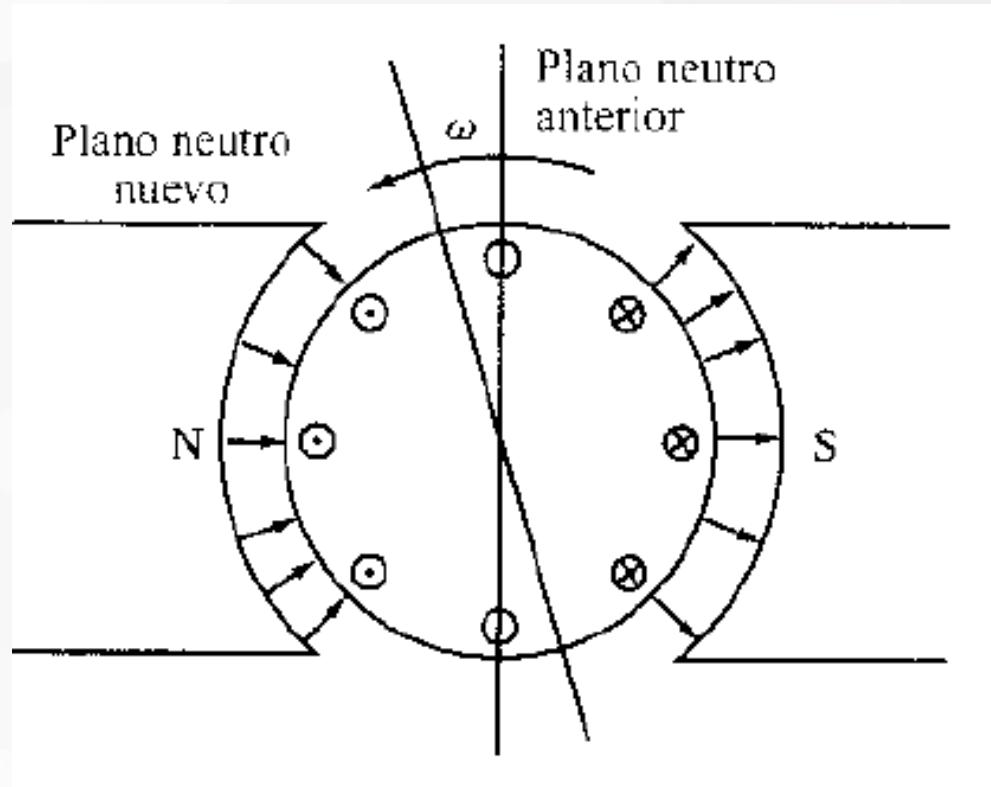
Reacción de Inducido (o de Armadura)



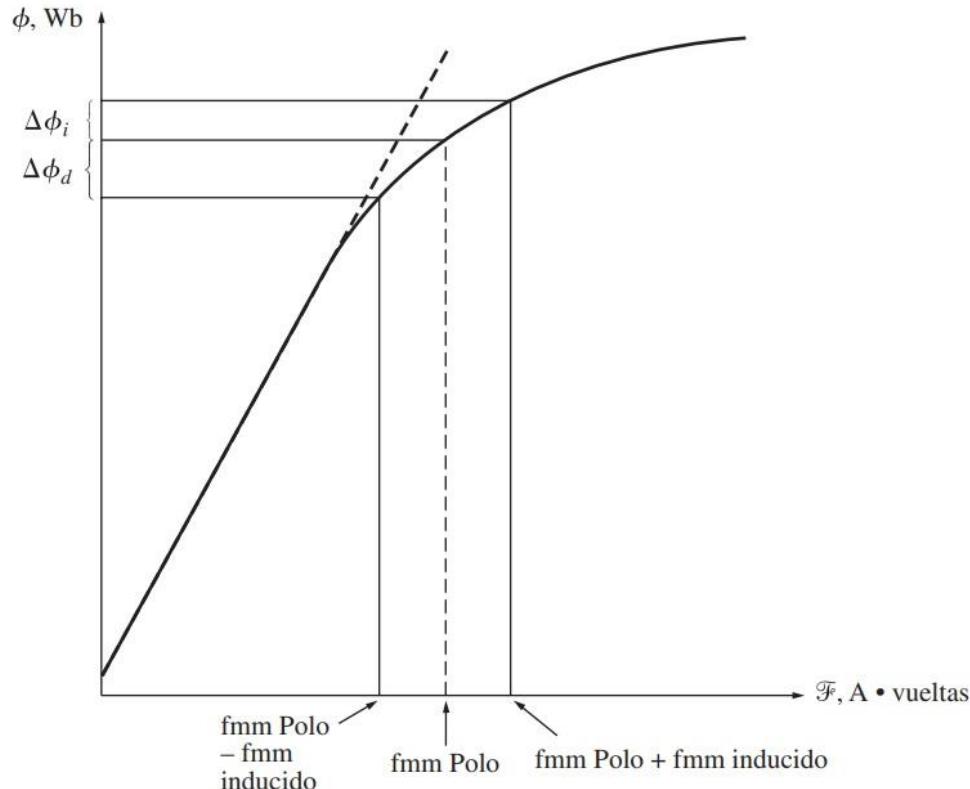
Reacción de Inducido (o de Armadura)



Reacción de Inducido (o de Armadura) (Desplazamiento de la ZNG)



Reacción de Inducido (o de Armadura) (Debilitamiento del Campo)



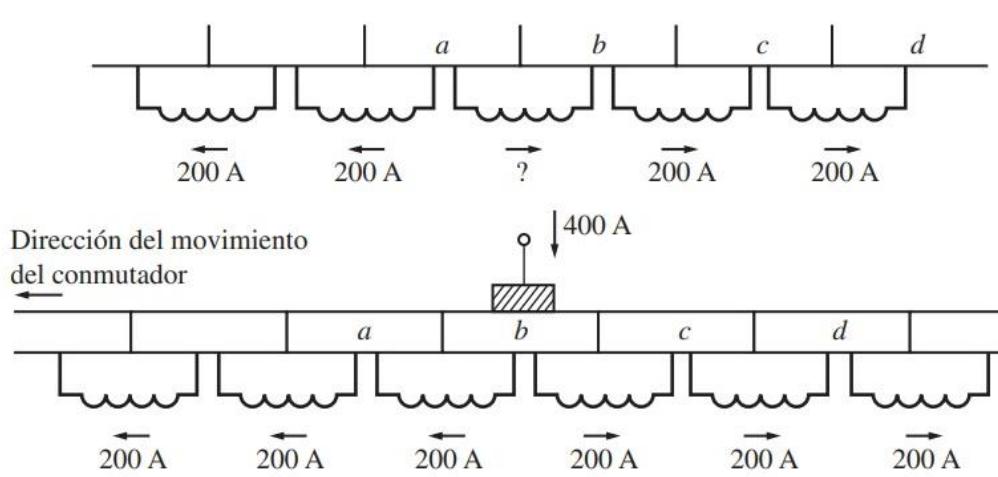
$\Delta\phi_i$ ≡ incremento del flujo bajo las secciones reforzadas de los polos

$\Delta\phi_d$ ≡ disminución del flujo bajo las secciones de los polos que se restan

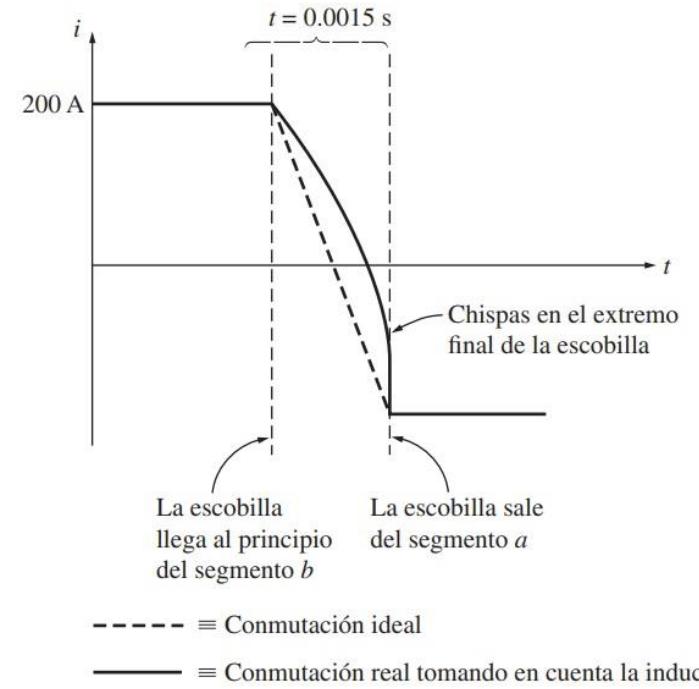
Voltajes $L \frac{di}{dt}$

- Es un problema de tipo Mecánico
- El rotor gira a una velocidad elevada y no alcanza a que la bobina que deberá ser cortocircuitada pueda deshacerse de su Tensión y /o corriente
- La bobina se opone a cambios bruscos de corriente
- Este problema ocasiona chisporroteo

Voltajes



$$L \frac{di}{dt}$$



Soluciones a los Problemas de Commutación

- Solución Manual
 - Desplazamiento de las escobillas
- Solución Automática
 - Devanado de Compensación (Ataca al problema de Reacción de Inducido)
 - Pólo de Commutación (Ataca al problema de Voltajes Ldi/dt)

Desplazamiento de las escobillas

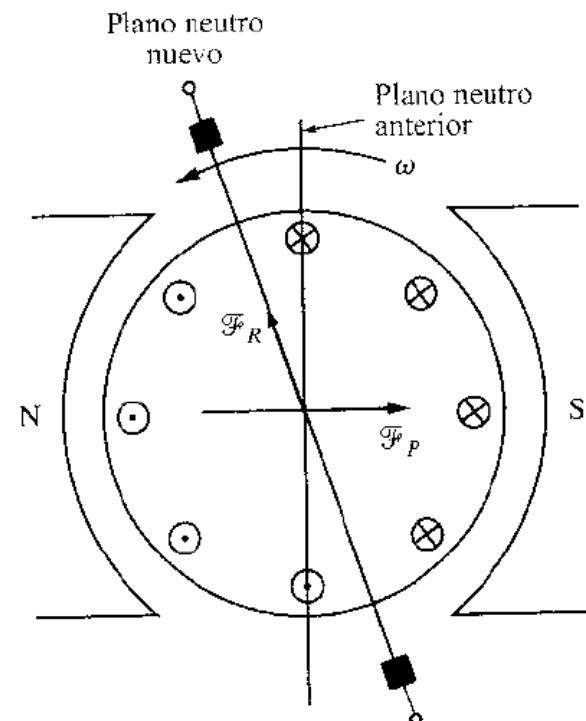
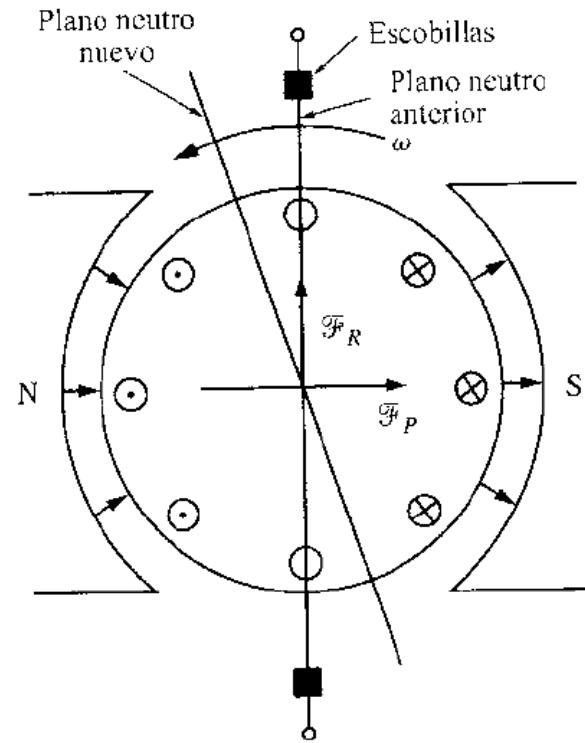
- Primera solución al problema de Desplazamiento de la ZNG, pero no evita el debilitamiento de campo
- Dependerá de la carga asociada a la máquina,

Desplazamiento de las escobillas

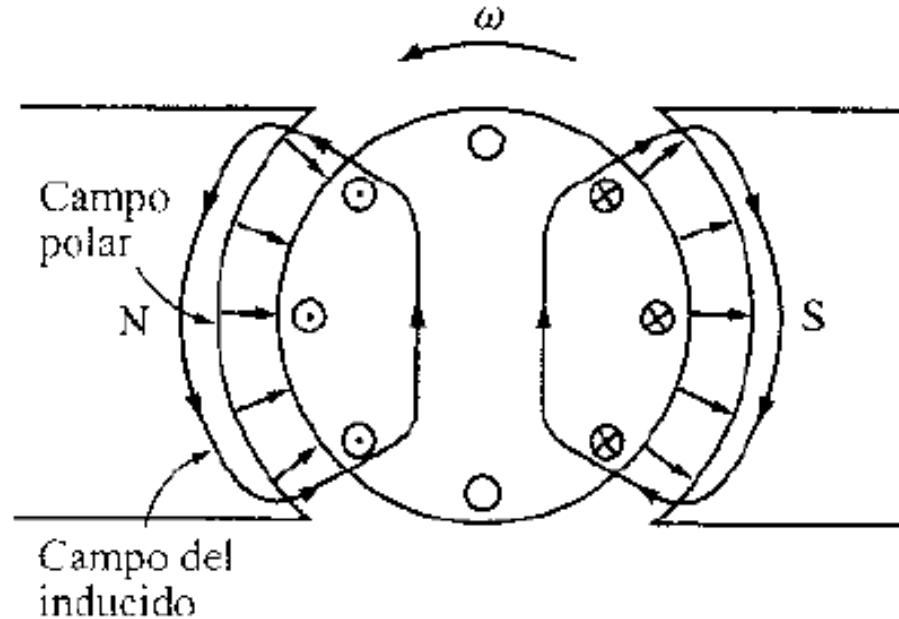
- Si la Carga es grande el decalamiento de la escobilla también lo será

- Si la Carga es poca el decalamiento de la escobilla también lo será

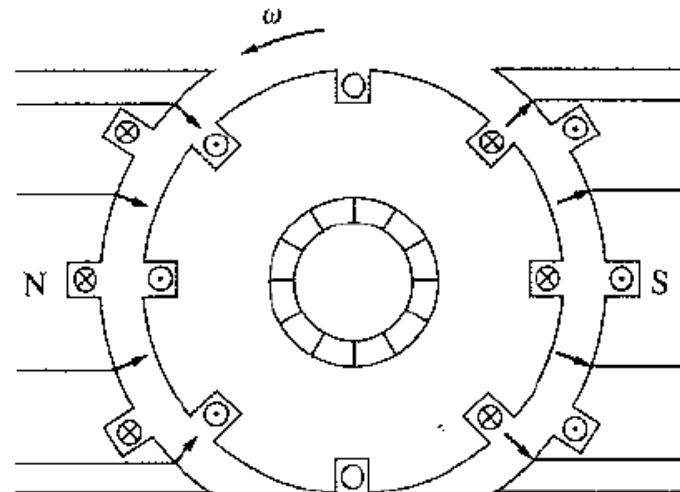
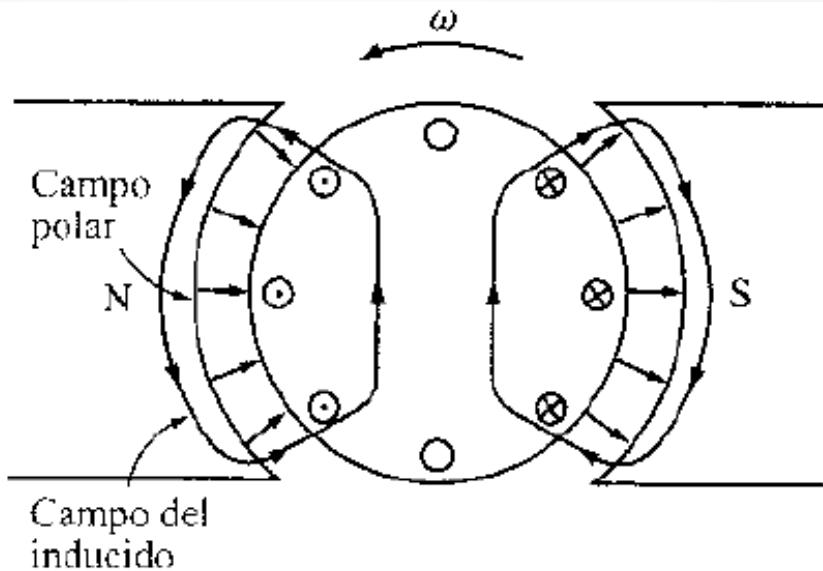
Desplazamiento de las escobillas



Devanado de Compensación

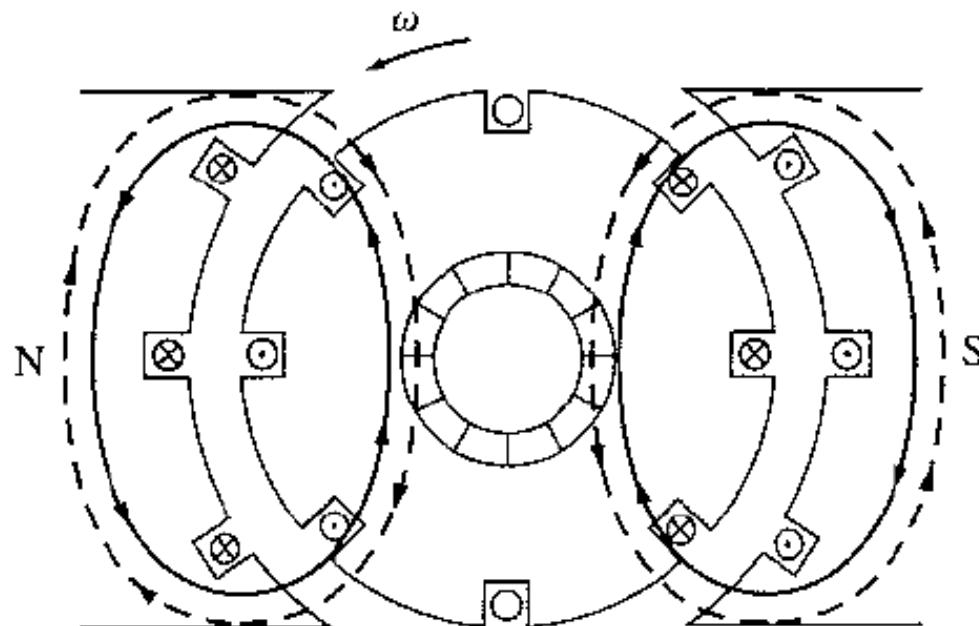


Devanado de Compensación

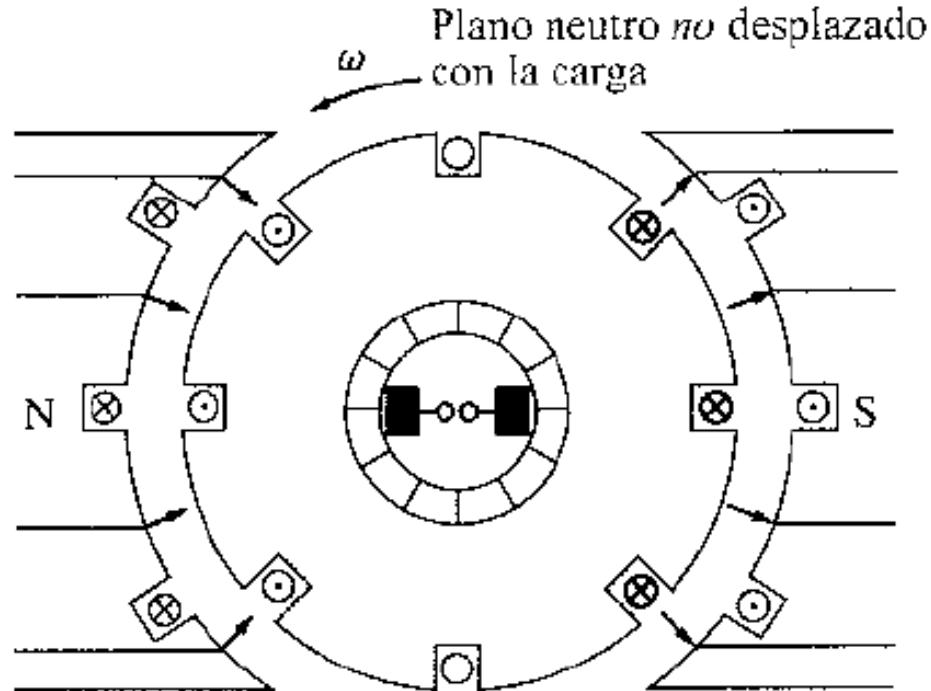


Devanado de Compensación

— Flujo del rotor (armadura)
- - - Flujo de los devanados de compensación



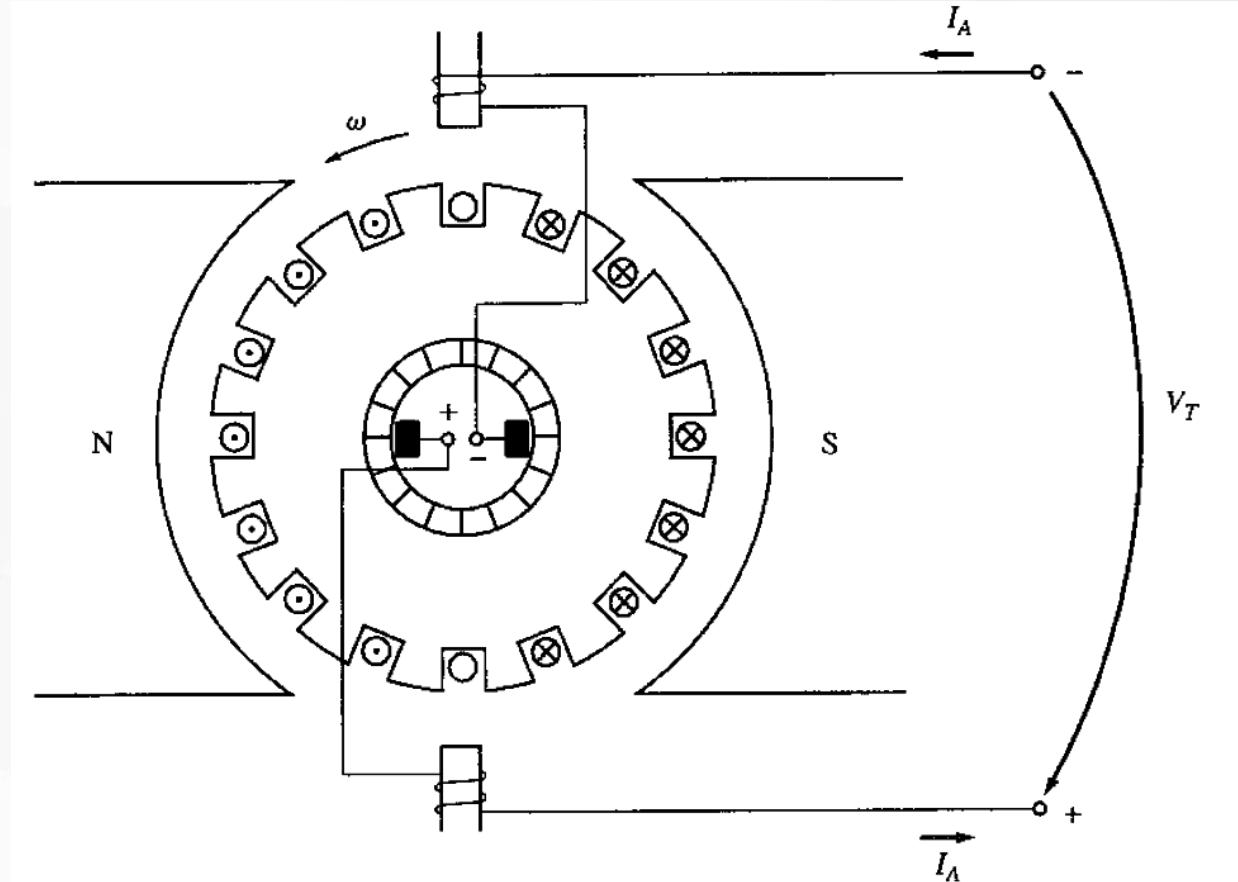
Devanado de Compensación



Polo de Comutación o Interpolos

- Busca eliminar los voltajes Ldi/dt
- Se conecta en serie con el circuito de Armadura
- Se sitúan en medio de los polos principales
- Su efecto no incide en el funcionamiento de la máquina por ser pequeños

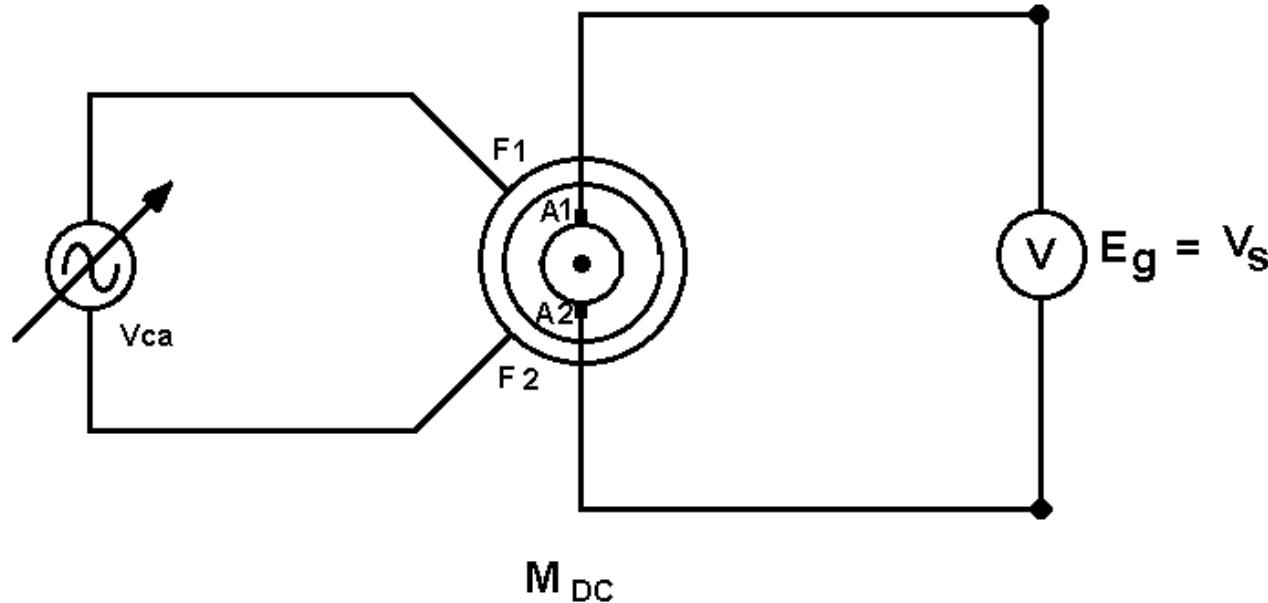
Polo de Comutación o Interpolos



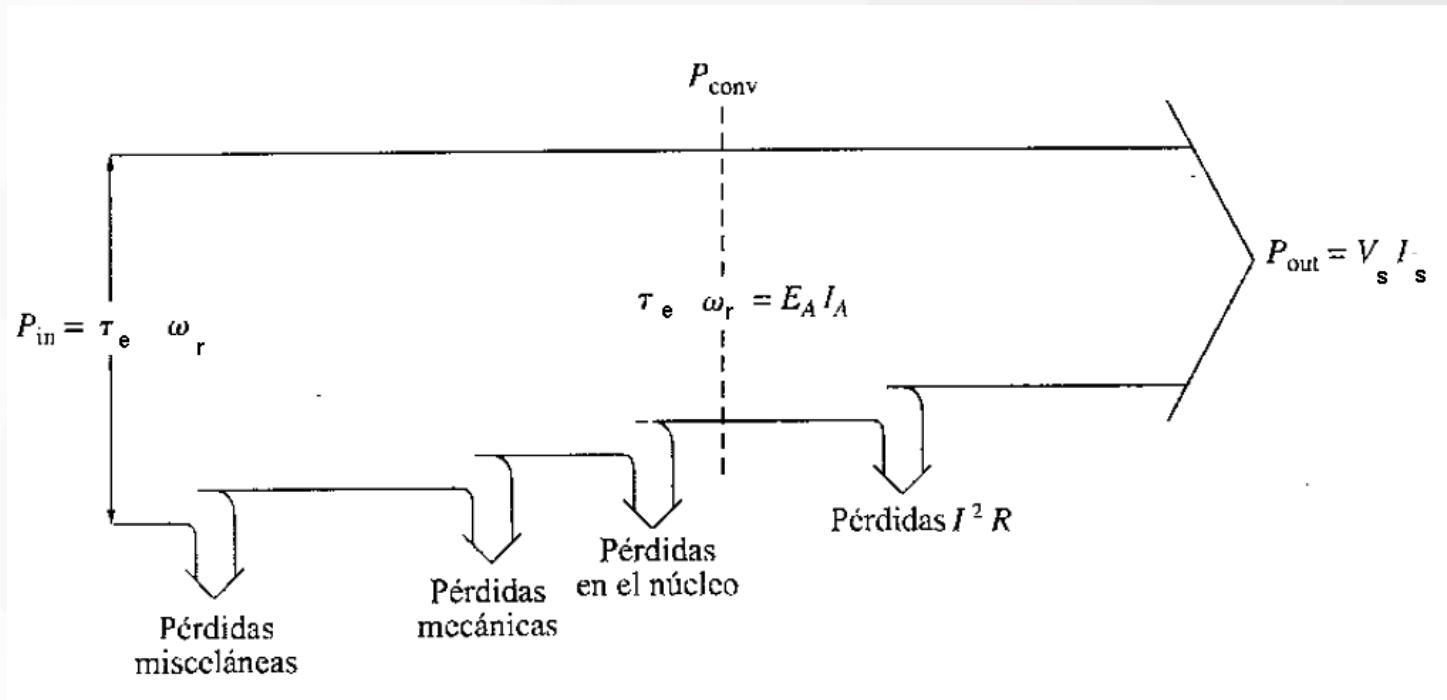
Ensayo para Determinar la Zona Neutra Geométrica en una Máquina DC

- Se alimenta a tensión reducida el devanado de Campo con una fuente de ca.
- Se mide la Tensión de salida en el circuito de Armadura
- Se decalan las escobillas hasta que la tensión de salida del circuito de armadura sea mínima (ideal $E_g = 0$). Allí estará la ZNG.

Ensayo para Determinar la Zona Neutra Geométrica en una Máquina DC

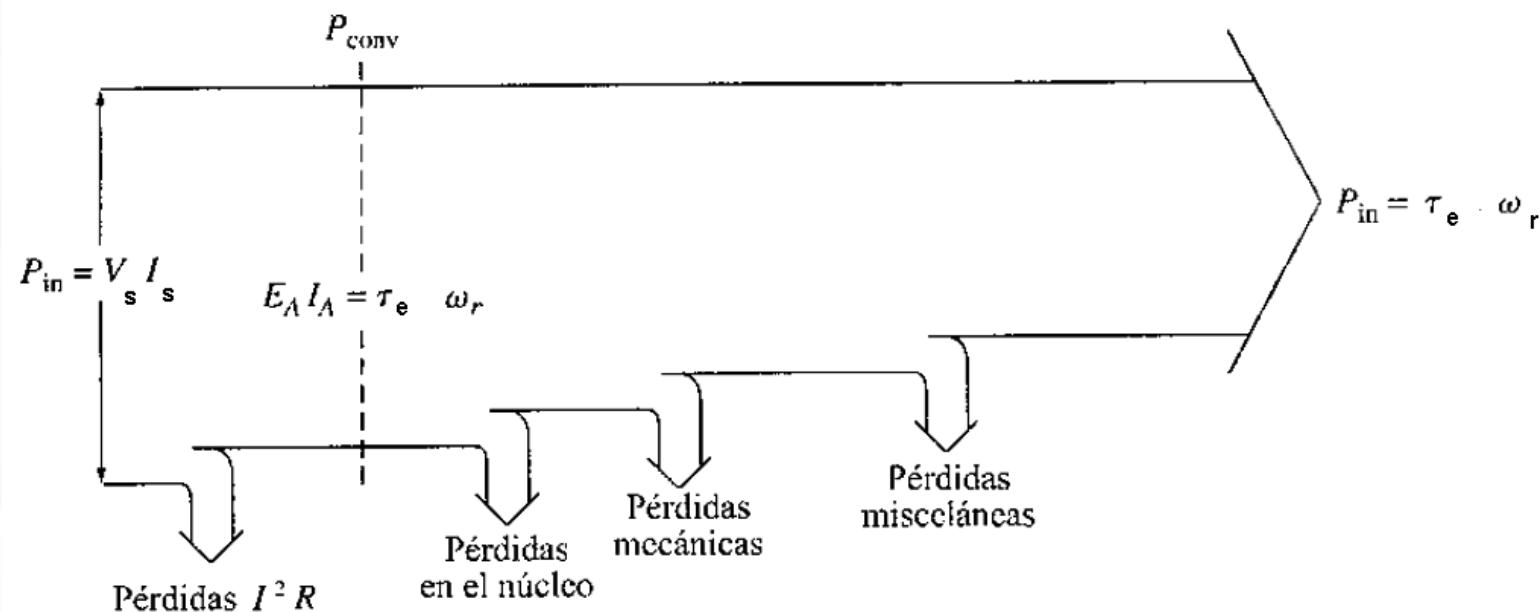


Balance Energético de las Máquinas DC



Generador

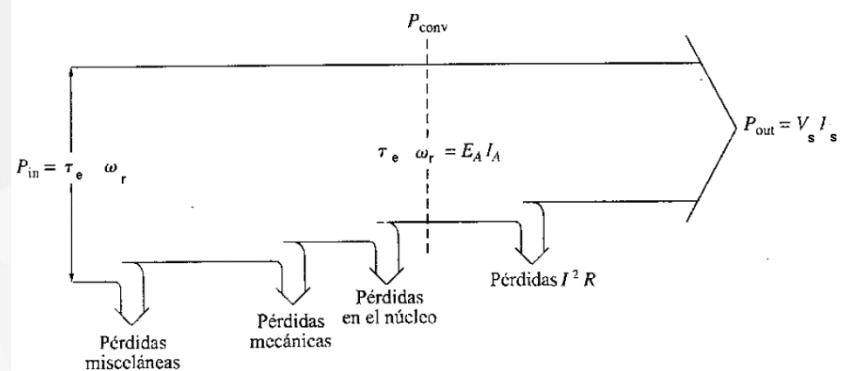
Balance Energético de las Máquinas DC



Motor

Balance Energético de las Máquinas DC

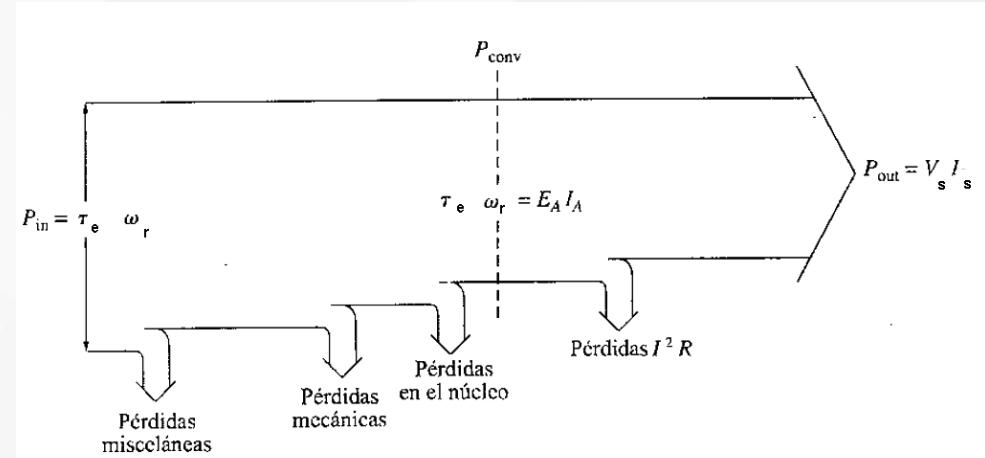
- Pérdidas Misceláneas: Pérdidas que no pueden ser asociadas en alguna de las demás pérdidas descritas en el balance.
- Pérdidas Mecánicas (P_m): Son pérdidas asociadas al rozamiento del eje de la máquina



Balance Energético de las Máquinas DC

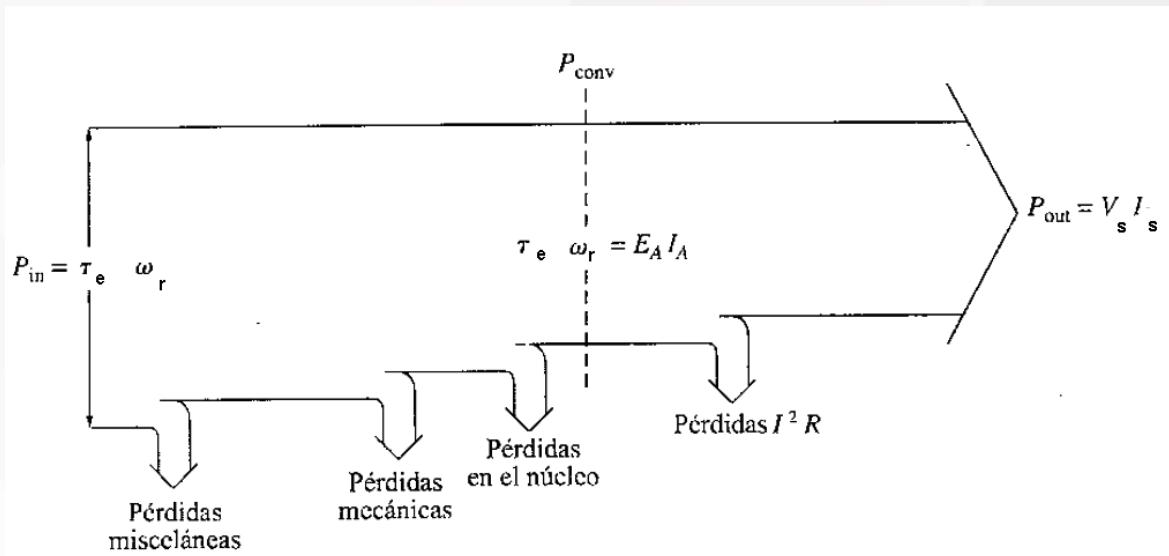
- Pérdidas del Núcleo (P_{fe}): Asociadas al calentamiento del material ferromagnético ocasionadas por el Ciclo de Histéresis y Corrientes de Foucault o Eddy

- Pérdidas del Cobre (P_{Cu}): Asociadas a calentamiento de los conductores



Balance Energético de las Máquinas DC

- Pérdidas en las Escobillas (P_{BD}): Asociadas al calentamiento por contacto de las escobillas y colector.



Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC

- Rendimiento (η)

$$\eta = \frac{PS}{PE} * 100 [\%]$$

$$PS = PE - Pérdidas$$

Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC

- Pérdidas en el Cobre (P_{Cu})

$$P_{Cu} = P_{Cuind} + P_{Cuf}$$

$$P_{Cuind} = I_A^2 R_a$$

$$P_{Cuf} = I_f^2 R_f$$

Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC

- Pérdidas en las Escobillas(P_{BD})

$$P_{BD} = V_{BD} I_A$$

Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC

- Potencia Mecánica (PM)
- Potencia Transmitida (PT)

$$PM = T_e \omega_r$$

$$PM = PT \quad (\text{Máquina DC})$$

$$PT = E_a I_a$$

Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC

- Potencia Entrada (PE)
- Potencia Salida (PS)

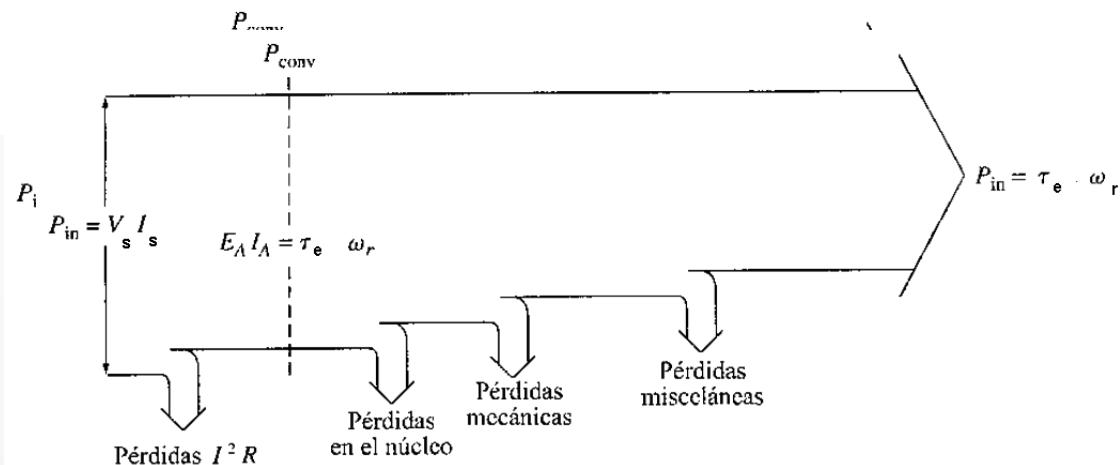
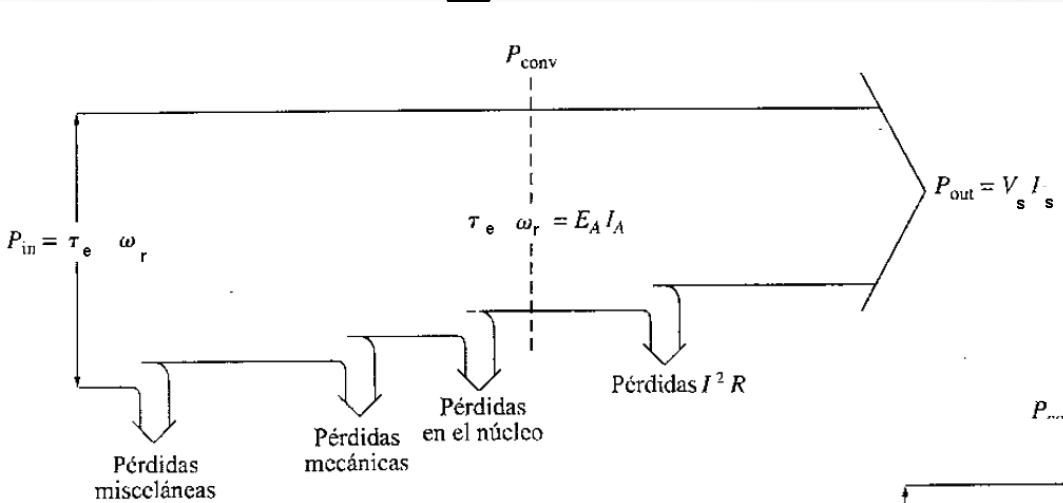
$$PE = T_{carg\,a} \omega_r \quad (G)$$

$$PE = V_s I_s \quad (M)$$

$$PS = V_s I_s \quad (G)$$

$$PS = T_{carg\,a} \omega_r \quad (M)$$

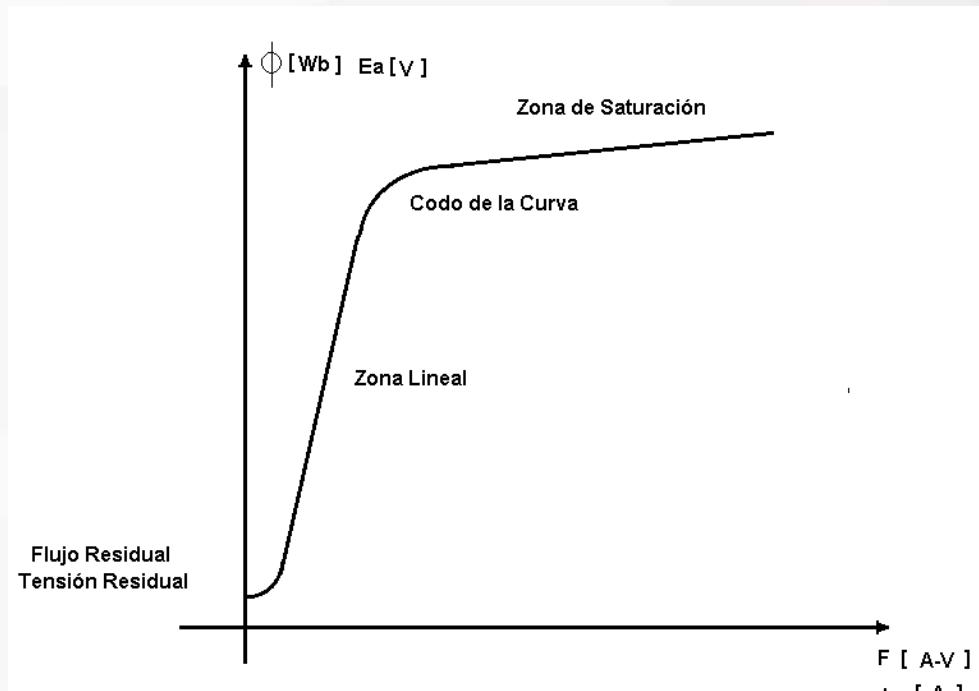
Ecuaciones Asociadas al Balance Energético de las Máquinas DC



Generador de Corriente Continua

- Tipos de Generadores:
 - Generador de Excitación Independiente
 - Generador Shunt (Paralelo)
 - Generador Serie
 - Generador Compound (Compuesto):
 - Generador Compound Largo
 - Generador Compound Corto

Característica de Magnetización (Vacío) de una Máquina DC



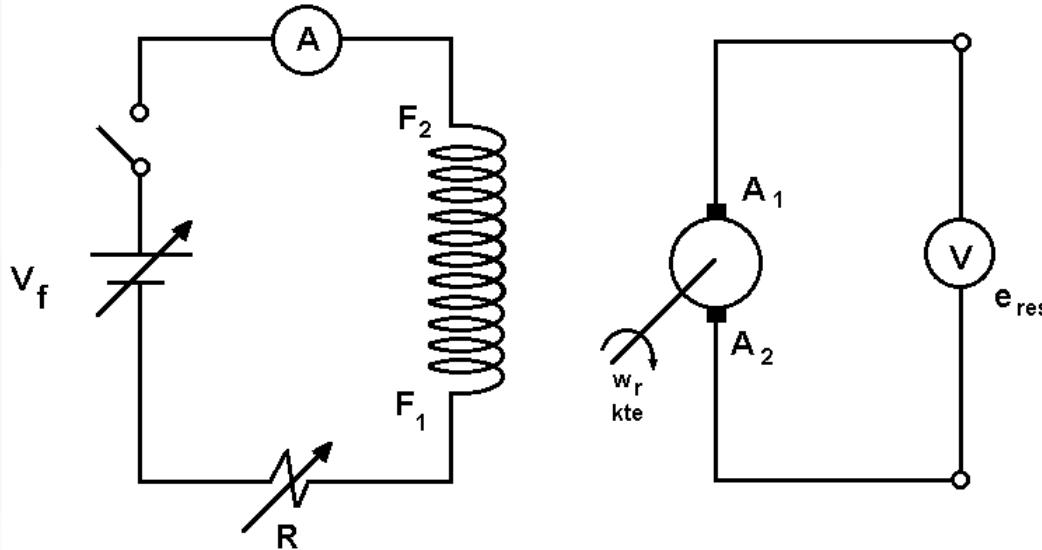
Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC

1.- Se conecta mecánicamente el eje del motor DC con otro mecanismo (normalmente otro motor) que garantice una velocidad de rotor nominal y constante durante todo el ensayo:

$$\left. \begin{array}{l} e_{ind} = k\Phi \omega_r \\ e_{ind} = k\Phi n_r \end{array} \right\} \omega_r, n_r = kte \Rightarrow e_{ind} = k_1 \Phi \quad \therefore \Phi = f(I_f)$$

Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC

- 2.- Se mide la tensión generada en los bornes del circuito de armadura con $I_f=0$, e_{res} , (Tensión residual)

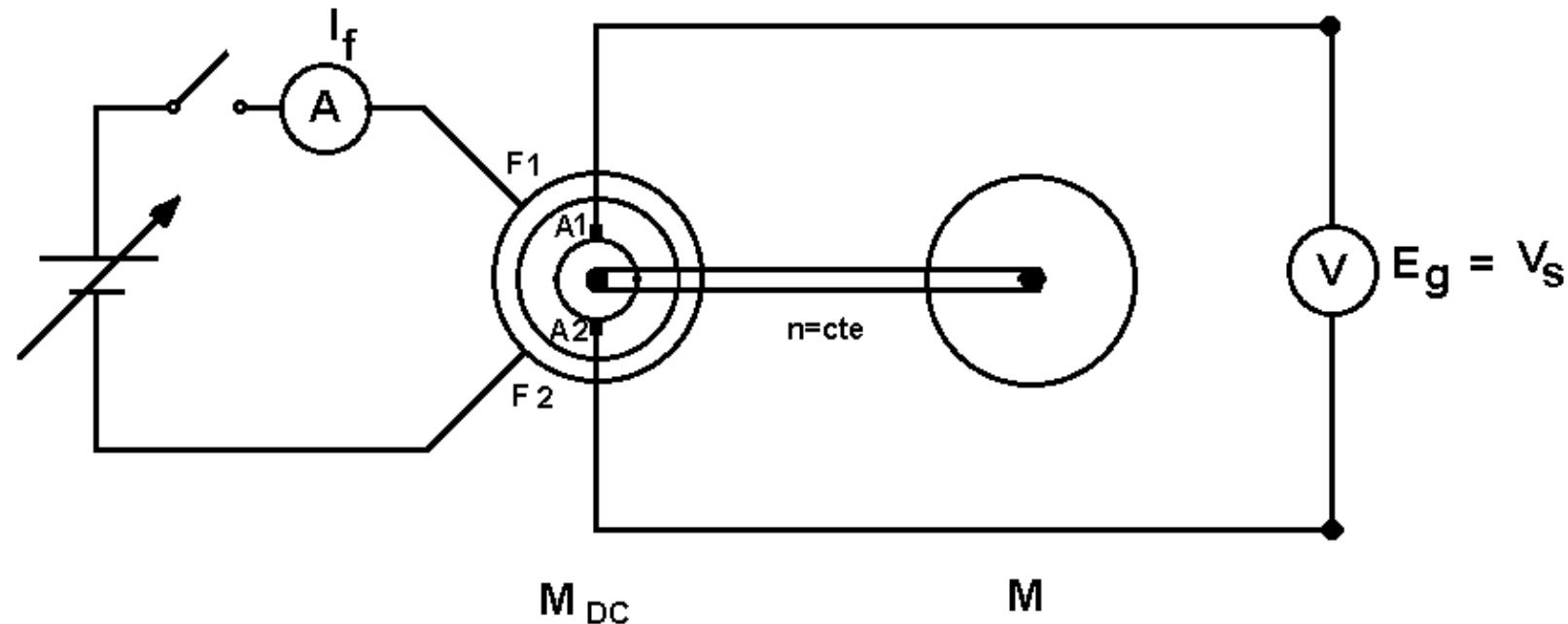


Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC

3.- Se alimenta el devanado de Campo con una fuente variable de tensión, garantizando un incremento pequeño al comienzo y final del ensayo para obtener la mayor cantidad de puntos en la zona lineal.

$$\left. \begin{array}{l} e_{ind} = k\Phi\omega_r \\ e_{ind} = k\Phi n_r \end{array} \right\} \omega_r, n_r = kte \Rightarrow e_{ind} = k_1\Phi \quad \therefore \Phi = f(I_f)$$

Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC



Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC

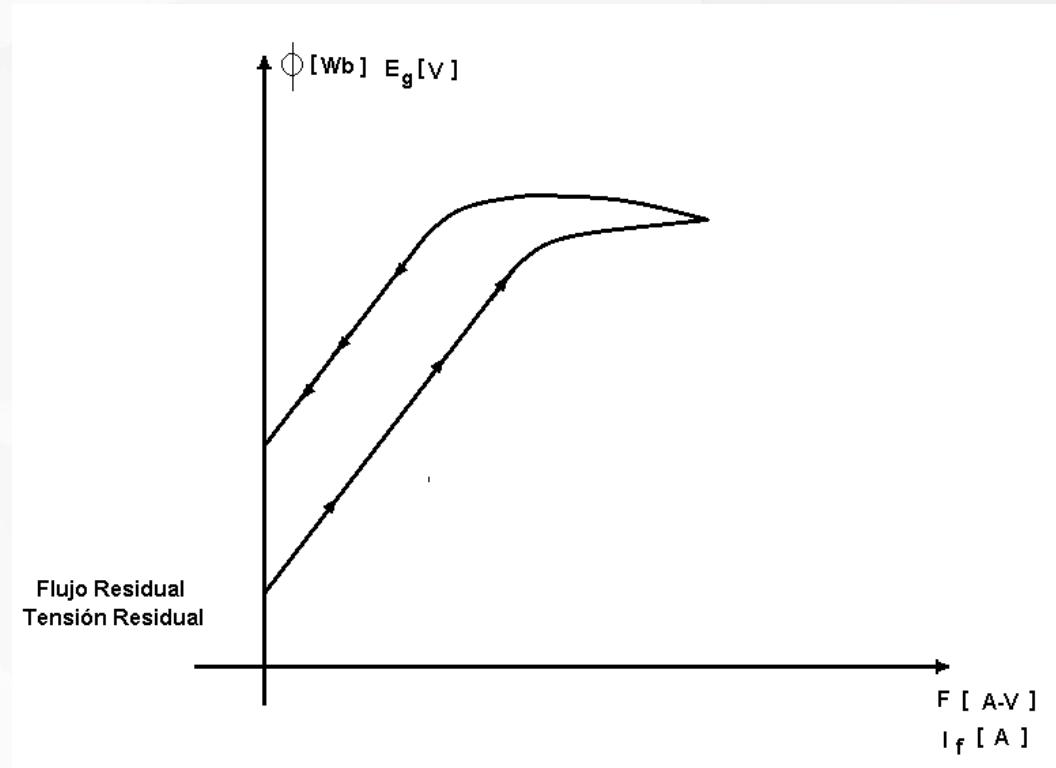
- Se lleva la tensión Generada E_g hasta un 120 o 130 %.
(Curva ascendente)

- Este incremento de tensión deberá realizarse siempre en forma ascendente evitando regresar el valor de I_f aplicado

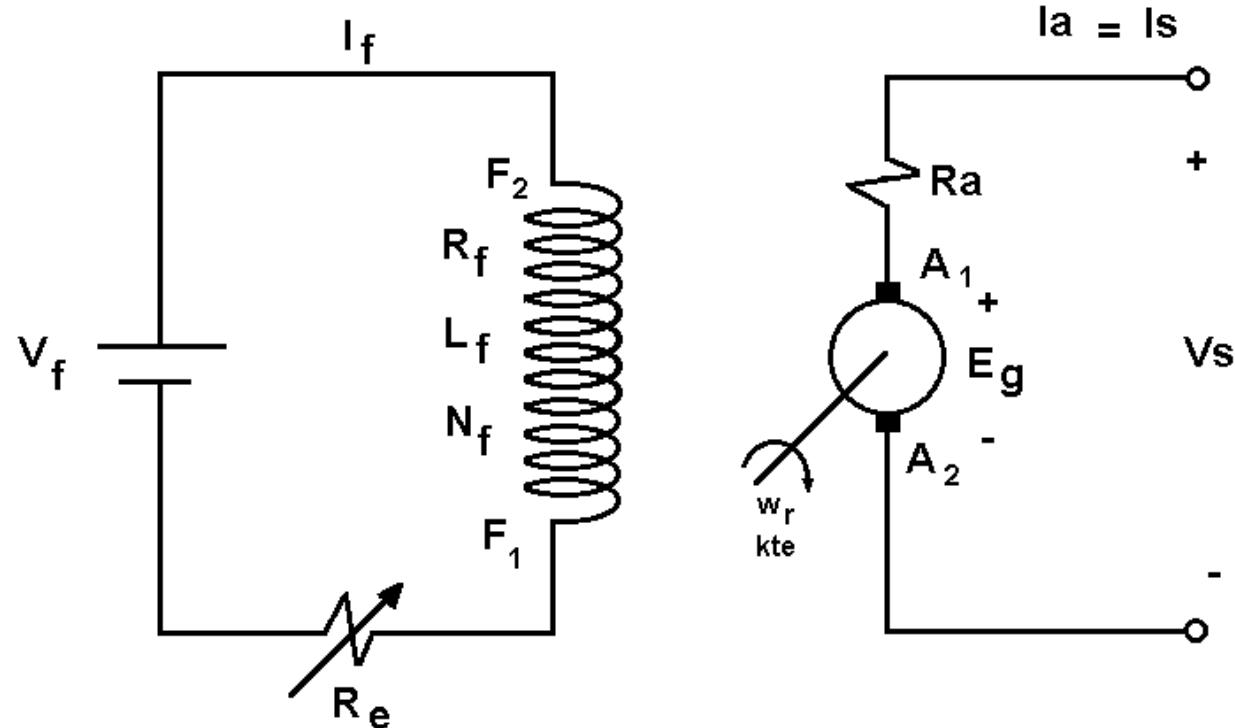
Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC

- Una vez obtenido el valor de E_g máximo se procede a disminuir la I_f hasta que dicha corriente llegue a cero (Curva descendente)

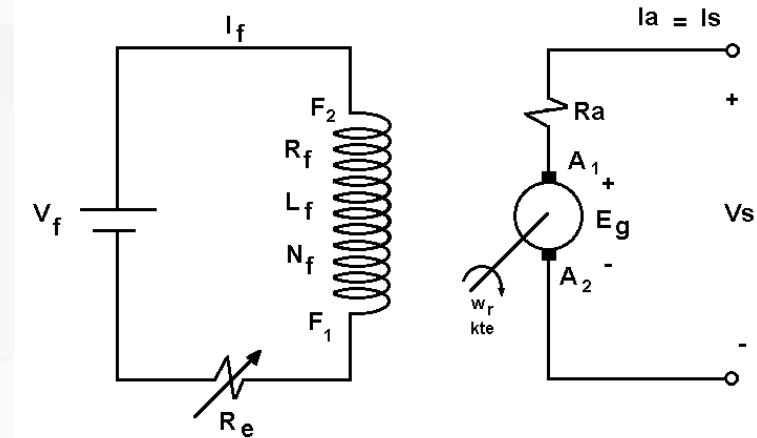
Ensayo para determinar la Característica de Magnetización de una Máquina DC



Generador de Excitación Independiente



Generador de Excitación Independiente



$$V_f = I_f (R_f + R_e)$$

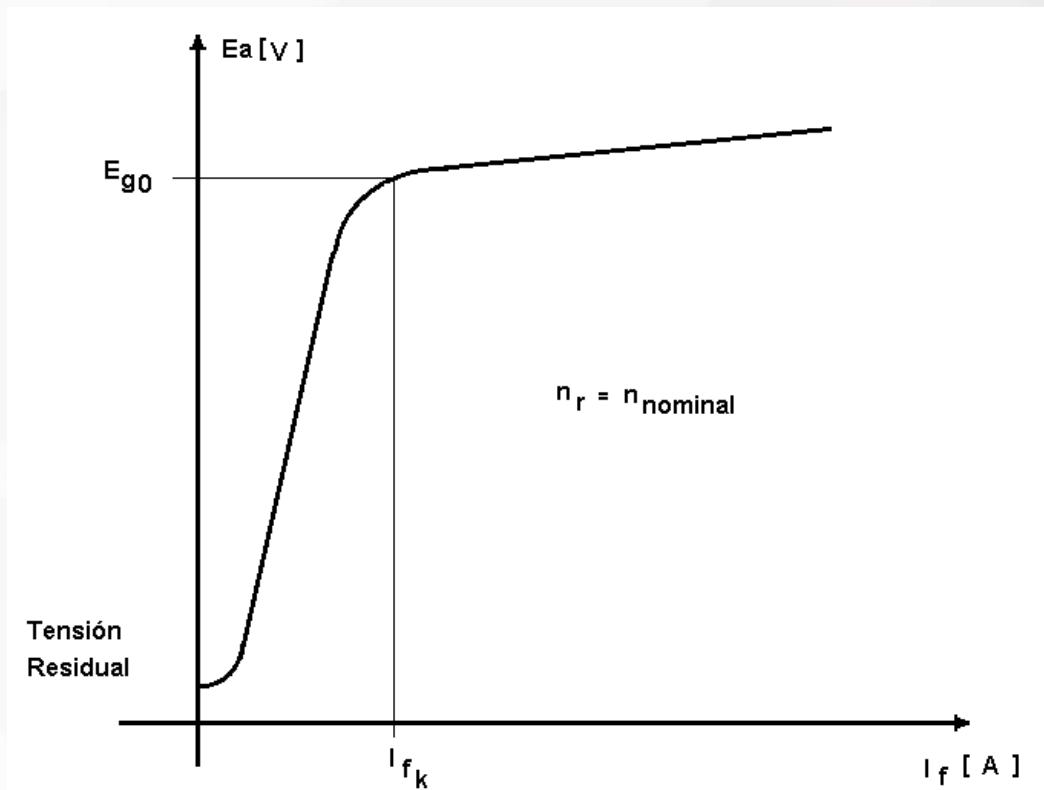
$$V_s = E_g - I_a R_a$$

$$E_g = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

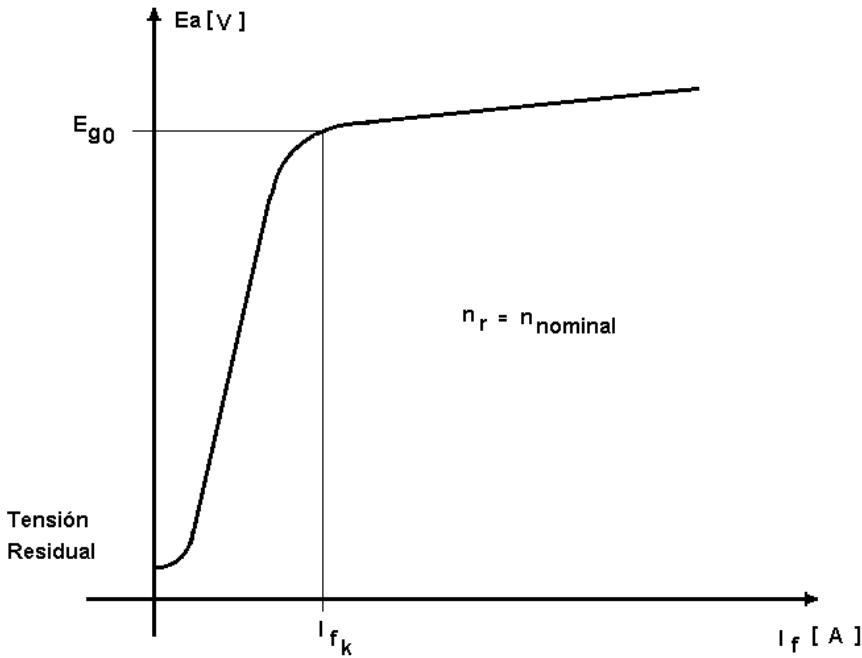
Determinación del Punto de Operación en vacío

- La determinación de E_g implica que no es Lineal (Curva de Magnetización)
- Debe usarse la característica de Magnetización de la Máquina
- Si el generador gira a una velocidad diferente de la nominal deberá hacerse la respectiva corrección
- El punto de Operación del generador en vacío lo determina el corte de I_f con la característica de Vacío

Determinación del Punto de Operación en Vacío



Determinación del Punto de Operación en Vacío

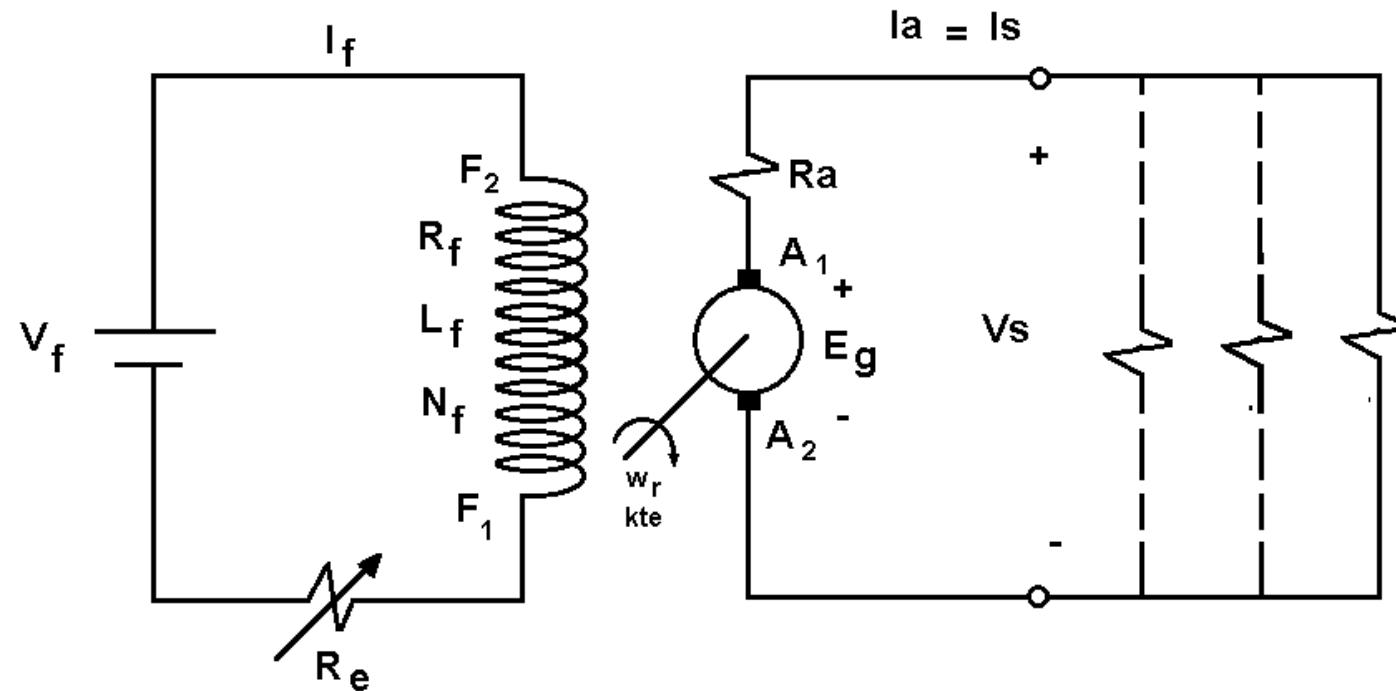


$$I_{fk} = \frac{V_f}{R_f + R_e}$$

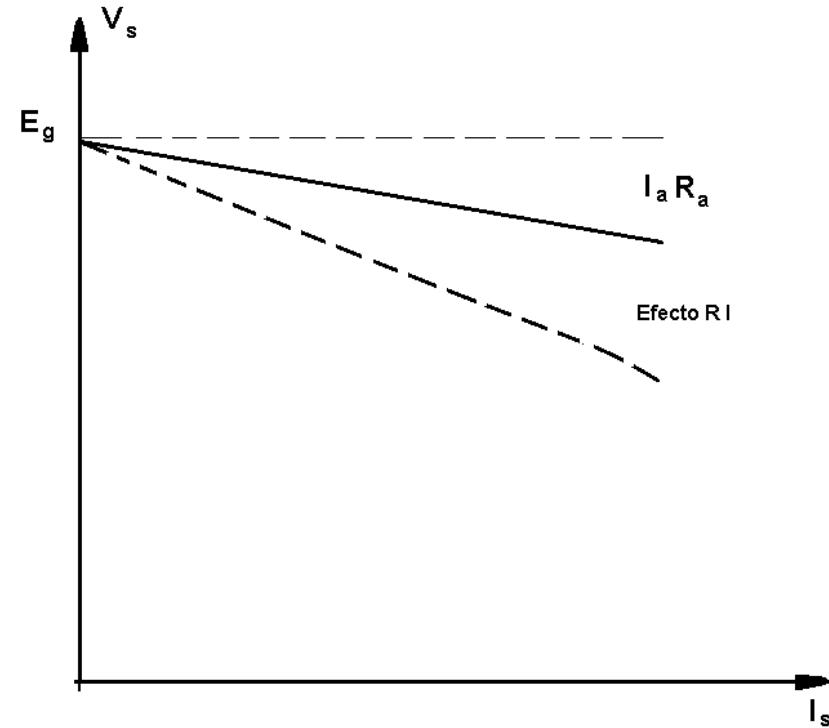
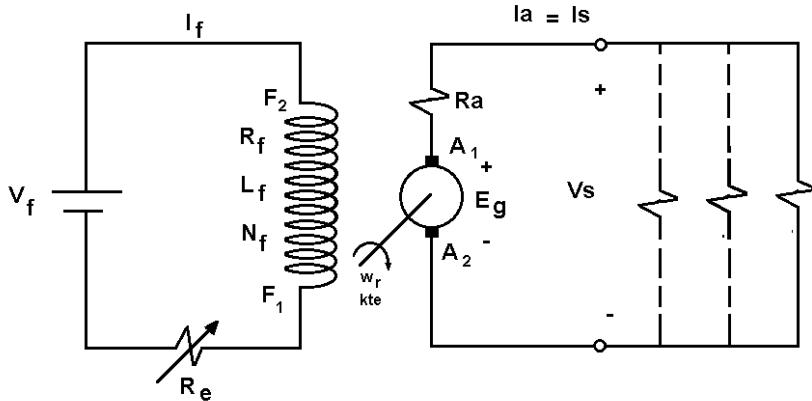
$$\left. \begin{array}{lll} E_{gn} & \alpha & n_{rn} \\ E_{gk} & \alpha & n_{rk} \end{array} \right\} \quad \Phi = cte \Rightarrow I_f = cte$$

$$\frac{E_{gn}}{E_{gk}} = \frac{n_{rn}}{n_{rk}}$$

Característica Externa del Generador de Excitación Independiente [$V_s = f(I_a)$]



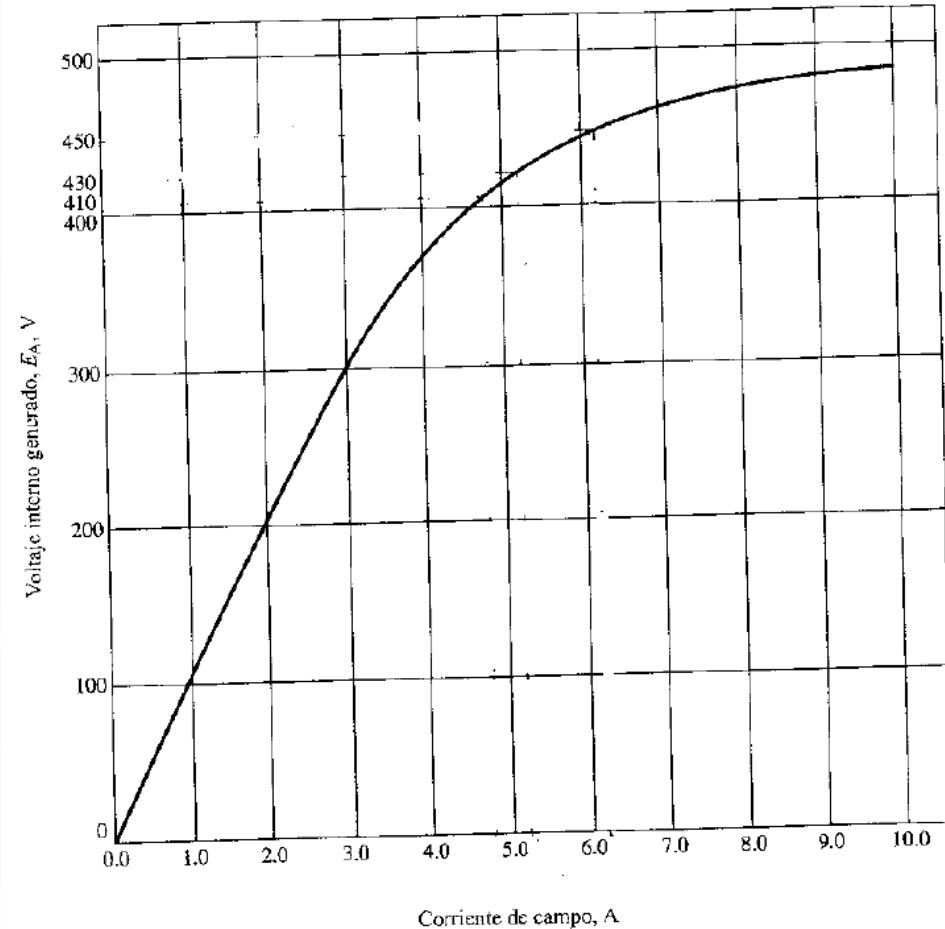
Característica Externa del Generador de Excitación Independiente [$V_s = f(I_a)$]



Ejemplo

- Para un Generador de Excitación Independiente con datos de placa: 172 KW; 430 V; 400 A; 1800 rpm, con los siguientes parámetros:
 - $R_a=0,05\Omega$ $R_f=20 \Omega$ $R_e= 0 \text{ a } 300 \Omega$ $N_f=1000$ espiras/polo $V_f=430 \text{ V}$
- Su curva de magnetización se muestra a continuación (para $n_r=1800 \text{ rpm}$)

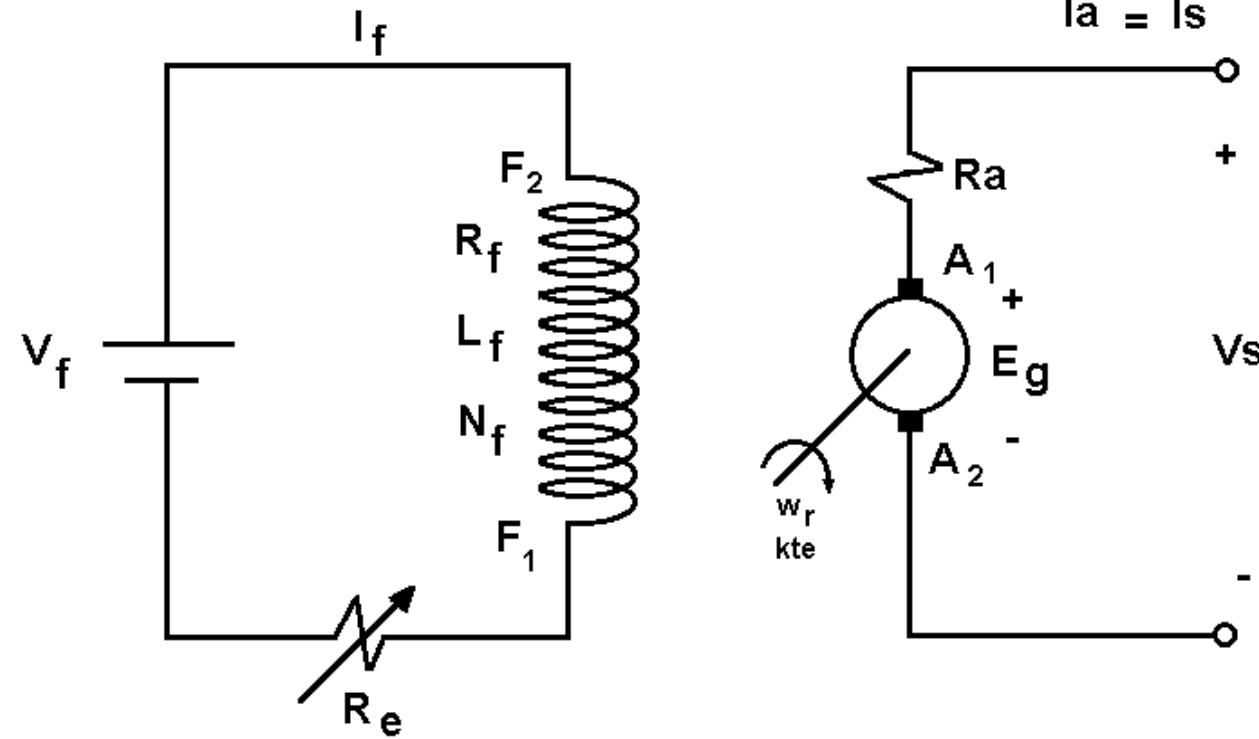
Ejemplo



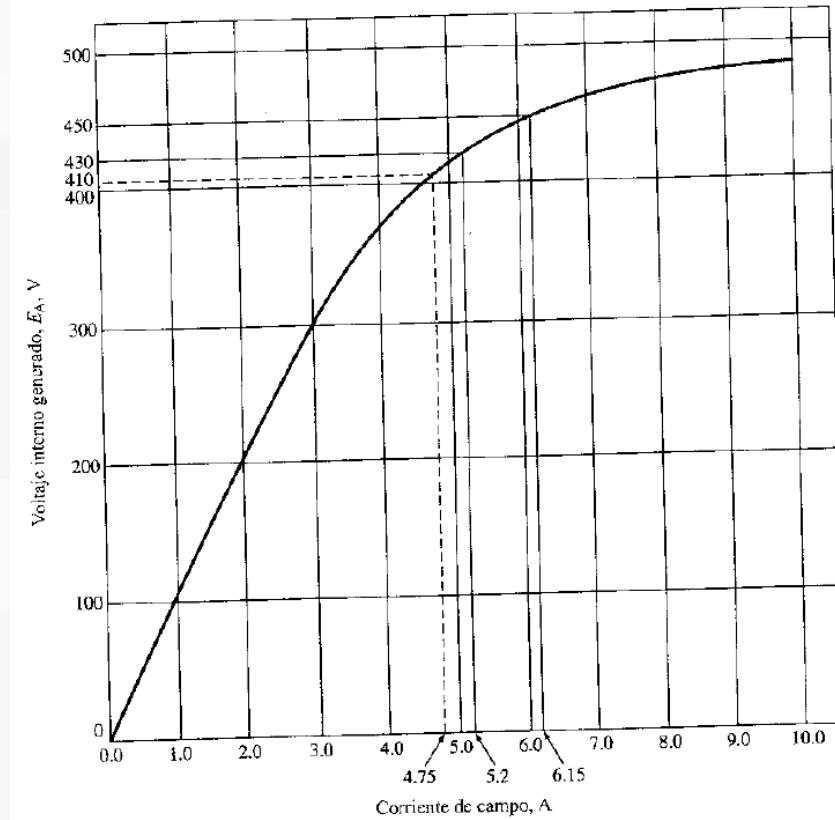
Ejemplo

- a.- Si la R_e se ajusta a 63Ω , encuentre el punto de operación de dicho generador en vacío sabiendo que la velocidad del rotor se ajustó a 1600 rpm
- b.- Cual será la tensión de salida sí se coloca una carga de 360 A (Asuma que el generador tiene devanados de Compensación)
- c.- Que ajustes deberá hacerse para mantener $V_s = E_{g0}$ del punto a
- d.- Cual será el nuevo valor de I_f y de R_e para cumplir con el literal c
- e.-Cual será la tensión de salida sí se coloca una carga de 360 A (Asuma que el generador NO tiene devanados de Compensación)
 $F_{RI}=450 \text{ A/V}$

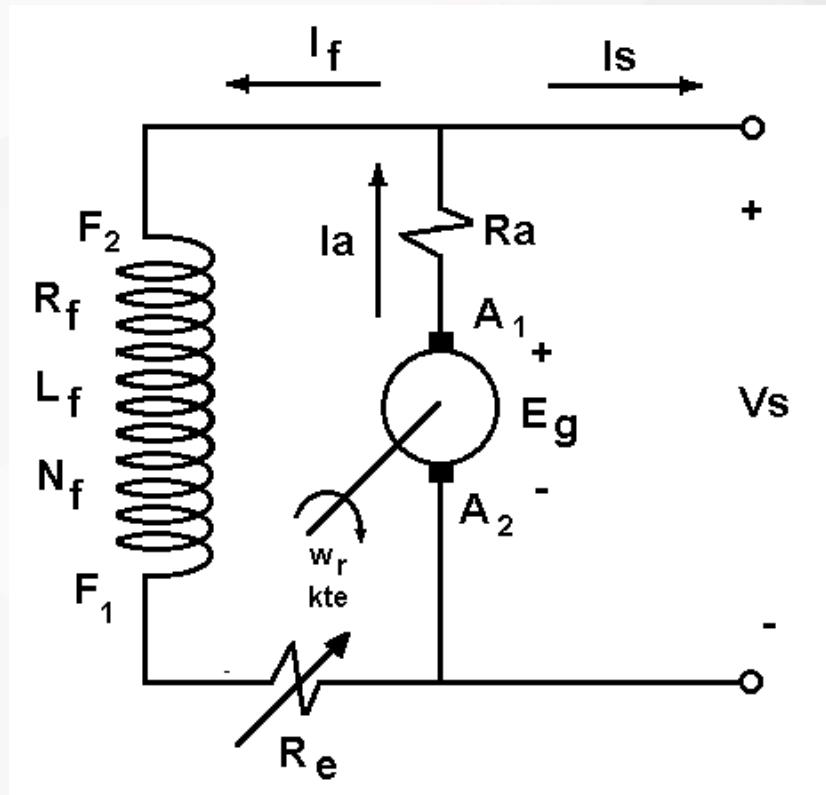
Ejemplo



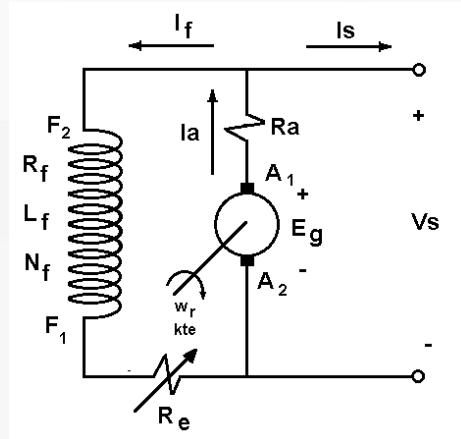
Ejemplo



Generador Shunt (Paralelo)



Generador Shunt (Paralelo)



$$I_f = \frac{V_s}{(R_f + R_e)}$$

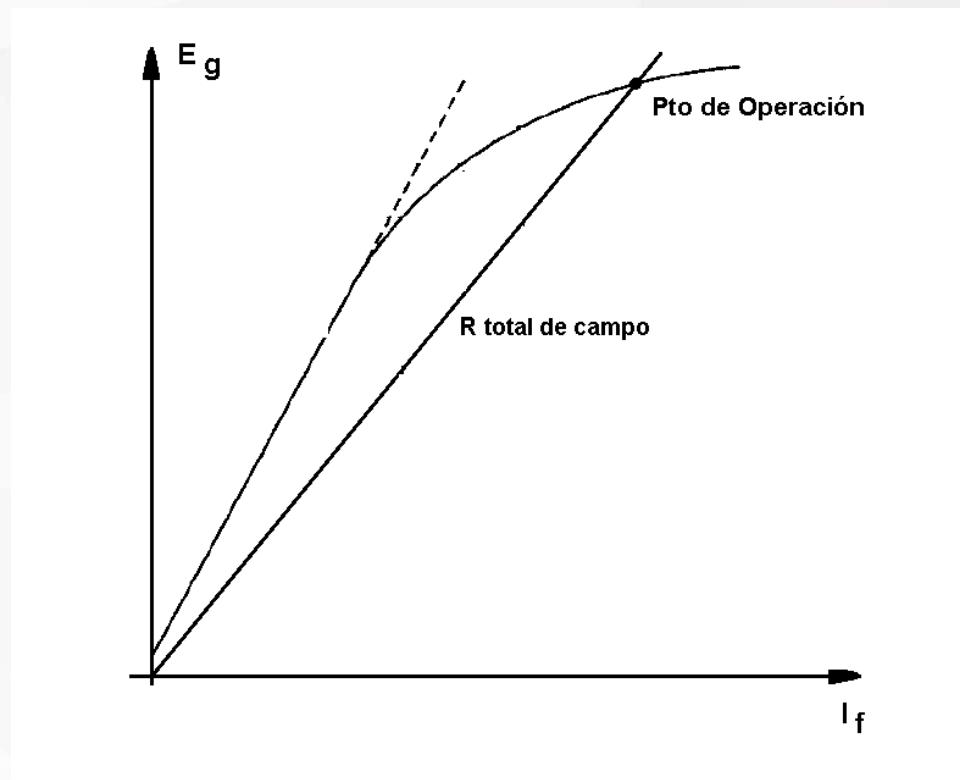
$$V_s = E_g - I_a R_a$$

$$E_g = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

Generador Shunt (Paralelo)

- Se elimina la fuente que alimenta el devanado de campo
- La Corriente I_f dependerá de la tensión de salida del generador
- Tiene menor desempeño que el Generador de excitación Independiente
- El punto de operación de la condición de vacío dependerá de la resistencia total de campo.

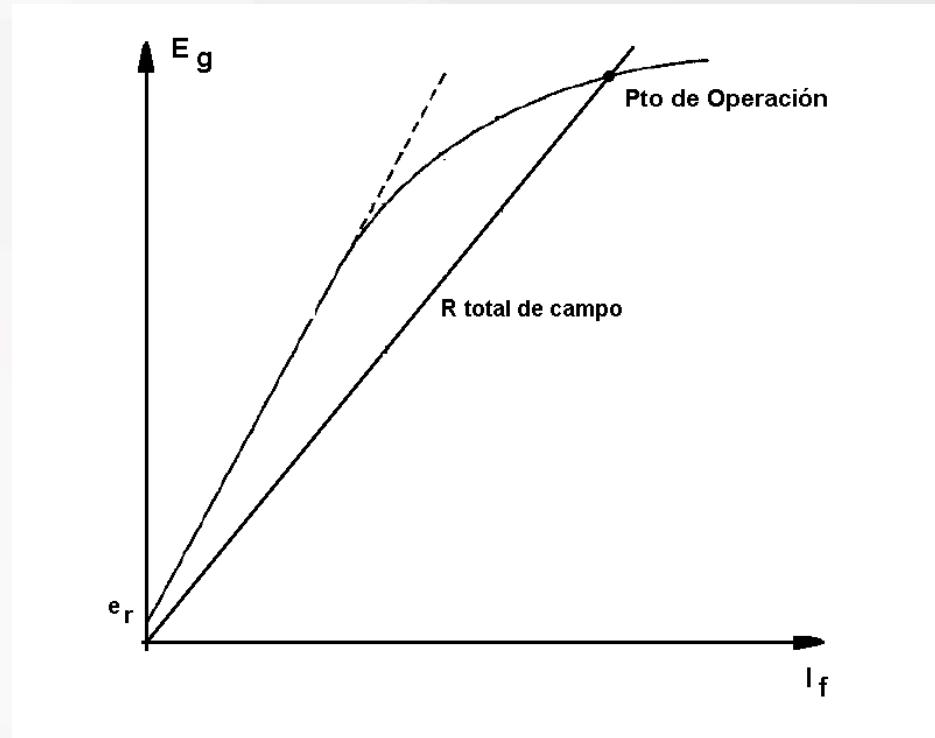
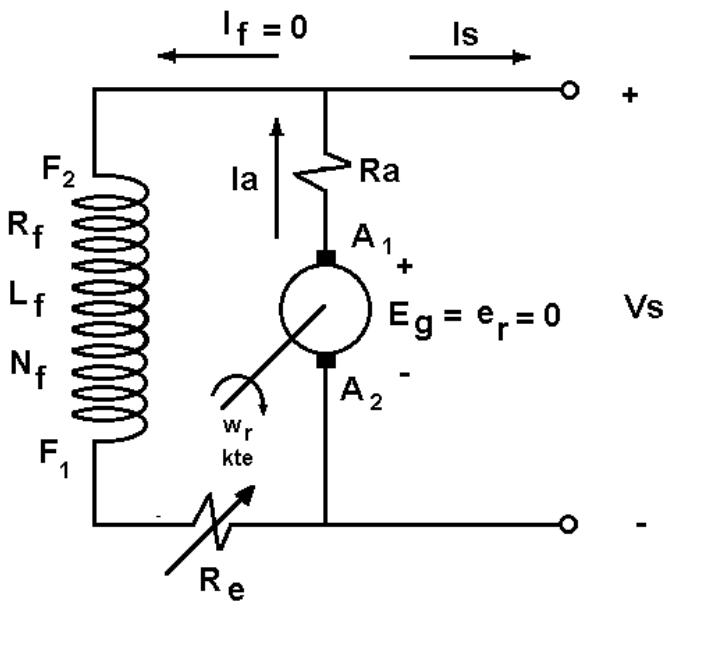
Punto de Operación en Vacío del Generador Shunt (Paralelo)



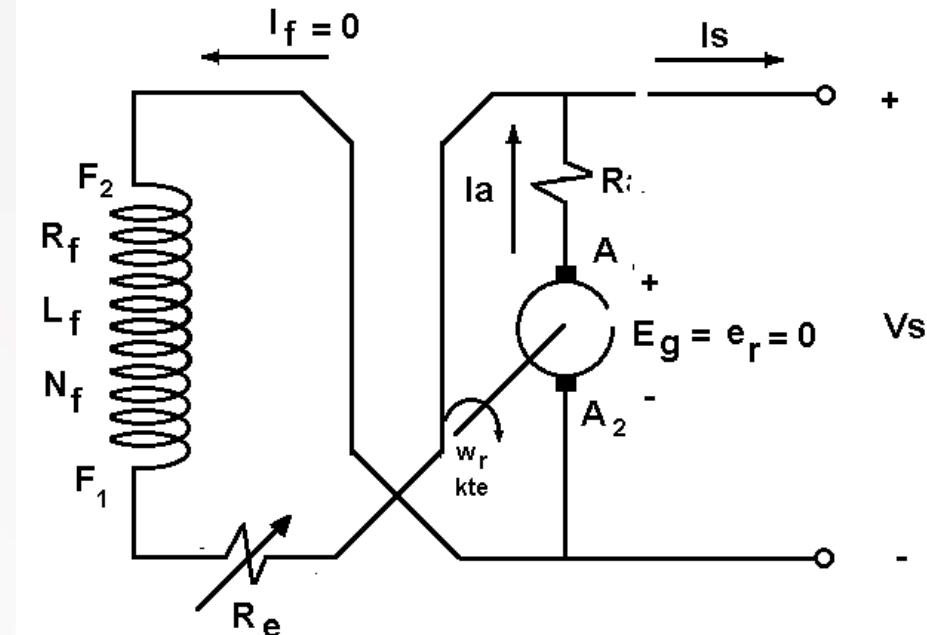
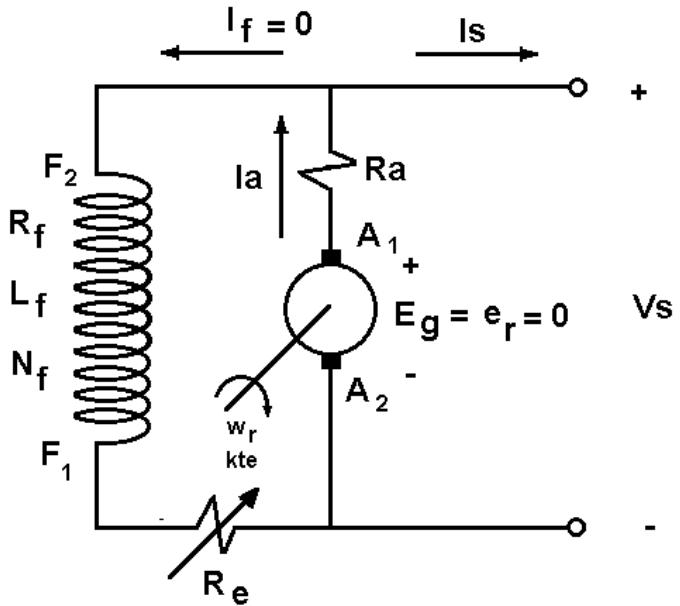
Razones por las que un Generador Shunt NO Genera

- Flujo Residual Nulo
- Al Momento de conectar el devanado de campo, éste produce campo en sentido contrario al del flujo residual
- Resistencia total de Campo muy grande

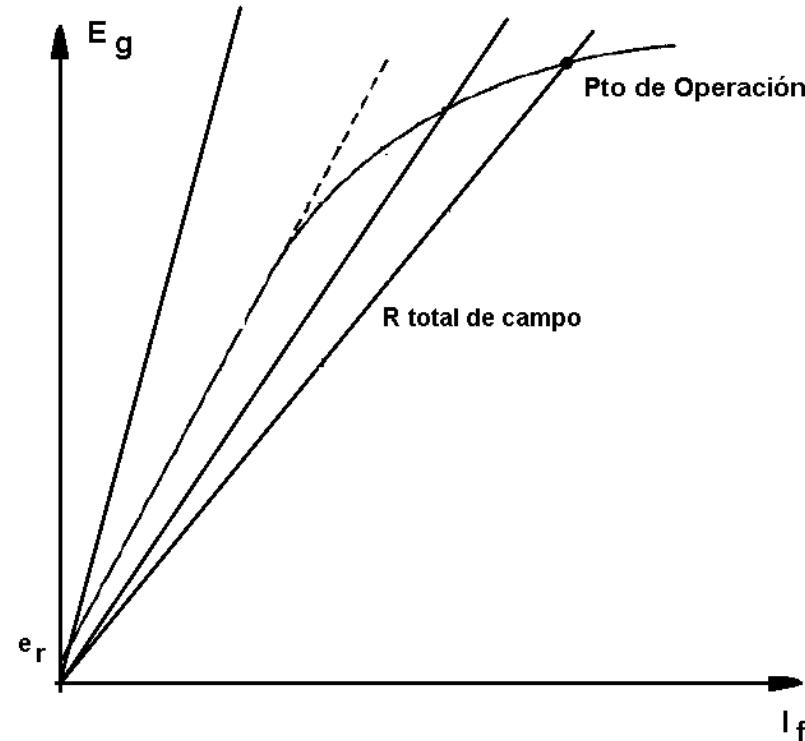
Flujo Residual Nulo



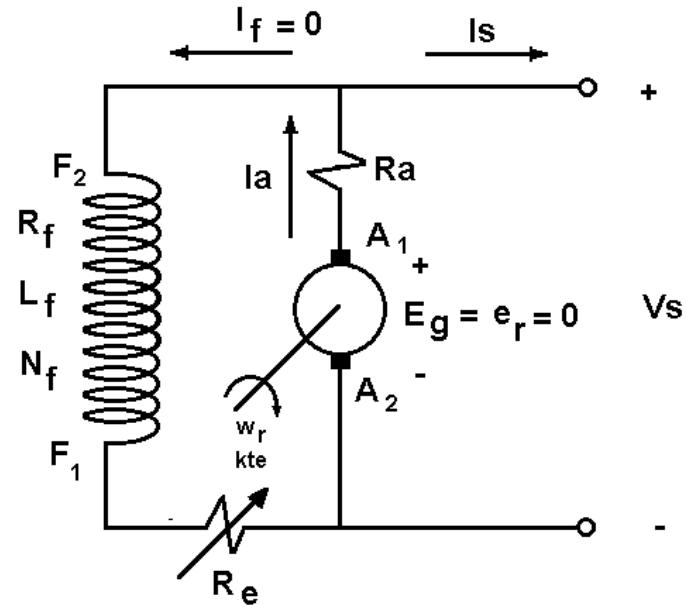
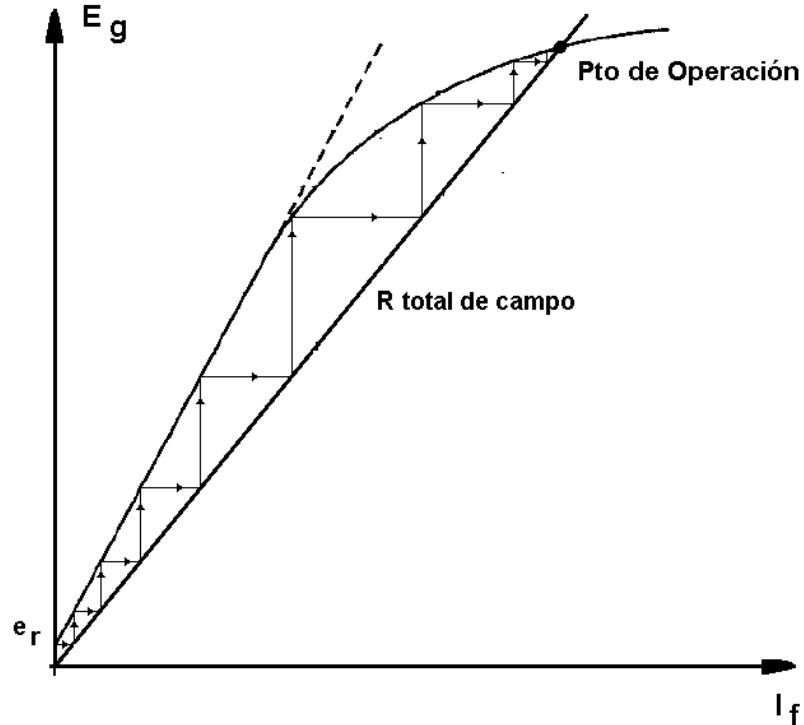
Disminución del Campo Residual



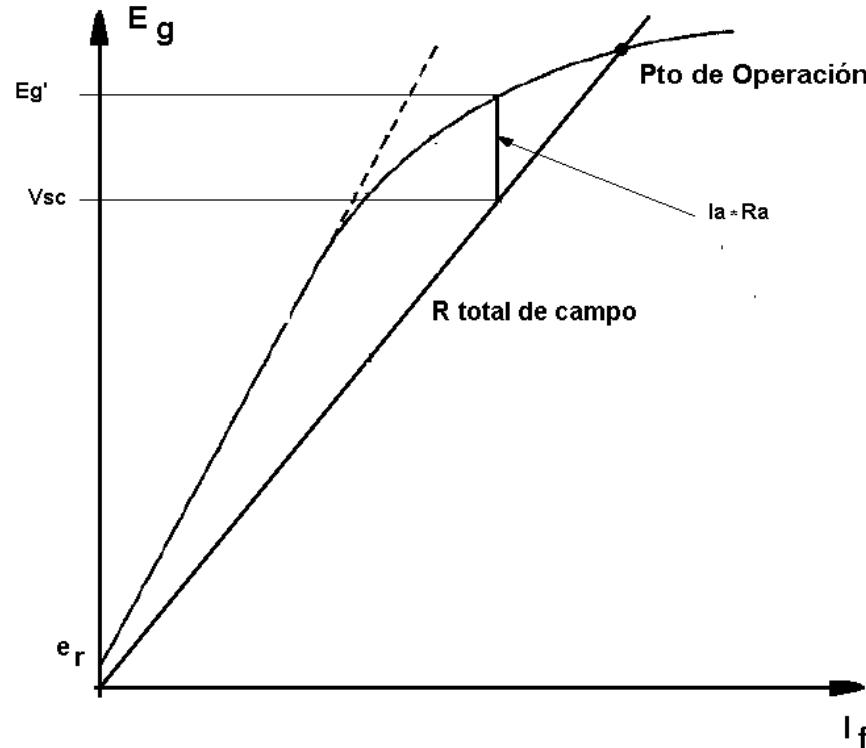
Resistencia Total de Campo muy Grande



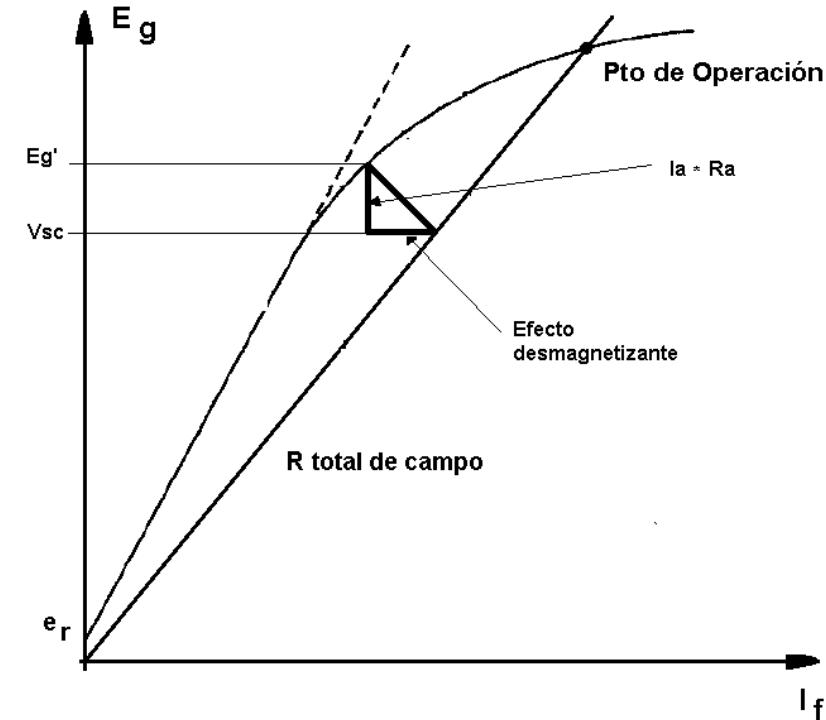
Generación de la Tensión de Salida del Generador Shunt



Caída $I_a \cdot R_a$ en un Generador Shunt

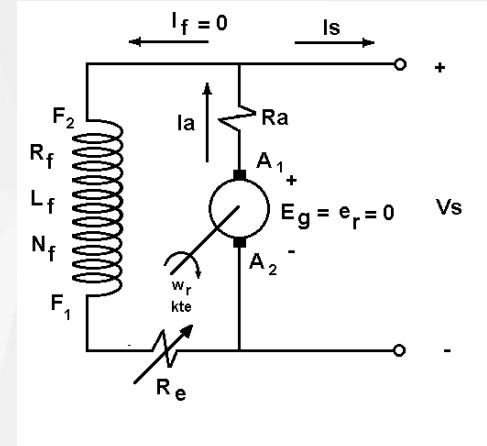


Reacción de Inducido en un Generador Shunt



Ejemplo

- Para un Generador Shunt o paralelo con $R_e=10$ ohmios, y la $n_{r0}=1800$ rpm con $R_a=0.18$ ohmios, $V_f=120$ V, $R_f=24$ ohmios, $N_f=1000$ esp/polo
- Determine la tensión de operación en vacío
- Suponiendo que hay reacción de inducido, determine V_{sc} para $I_a=20$ A y a 40 A (Asuma 500 Av para 40 A y 250 A-V para 20 A)
- Determine V_{sc} del caso anterior ahora con devanados de compensación



I_f (A)	0	0,8	1	1,28	1,44	2,88
E_g (V)	5	78	95	112	118	126

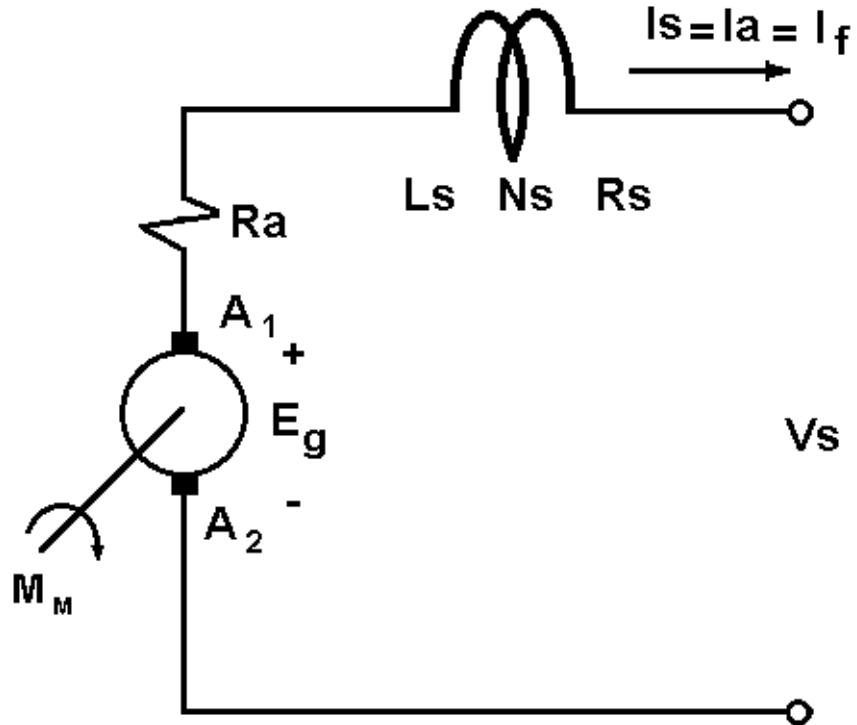
Generador Serie

- Este generador utiliza un devanado de pocas espiras de conductor grueso
- Este devanado se conecta en serie con la armadura
- No puede operar en vacío
- Muy mala regulación de velocidad

Devanado Serie

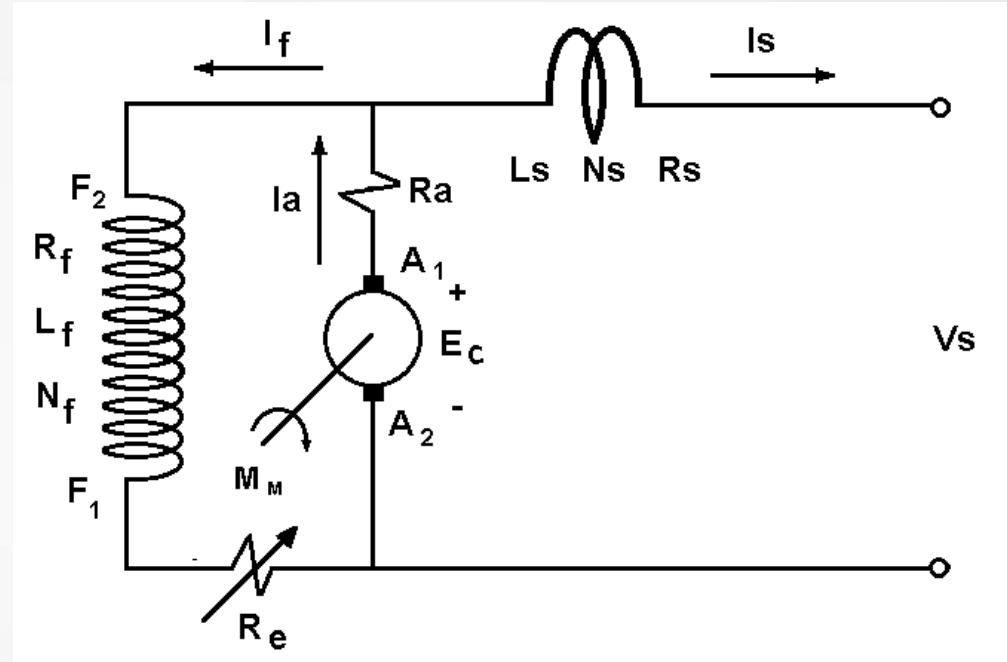
$$\mathcal{F} = N \mid \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{F} = N \mid \\ \mathcal{F} =_N \mid \end{array} \right.$$

Generador Serie

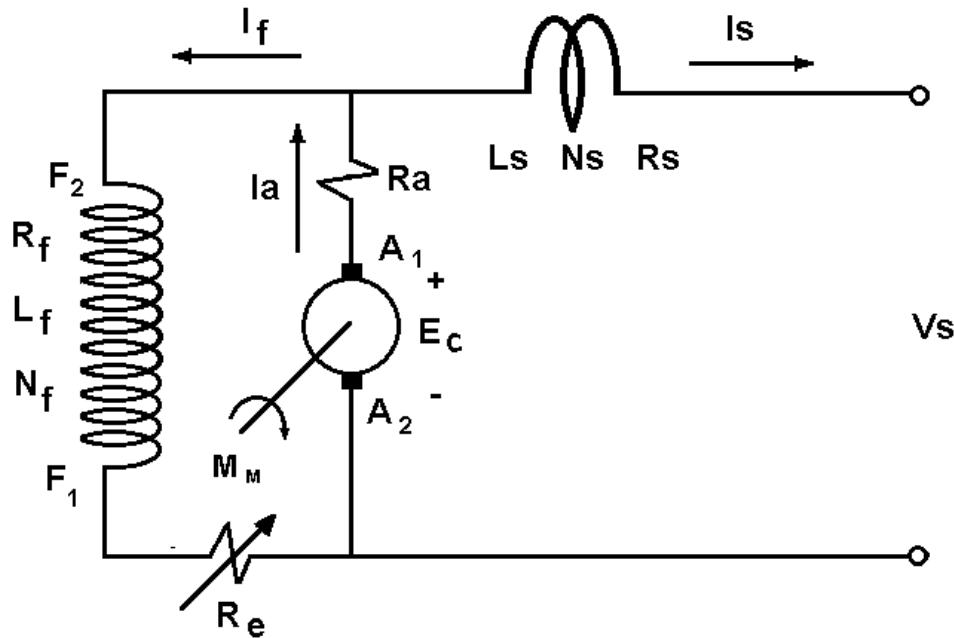


Generador Compound (Compuesto)

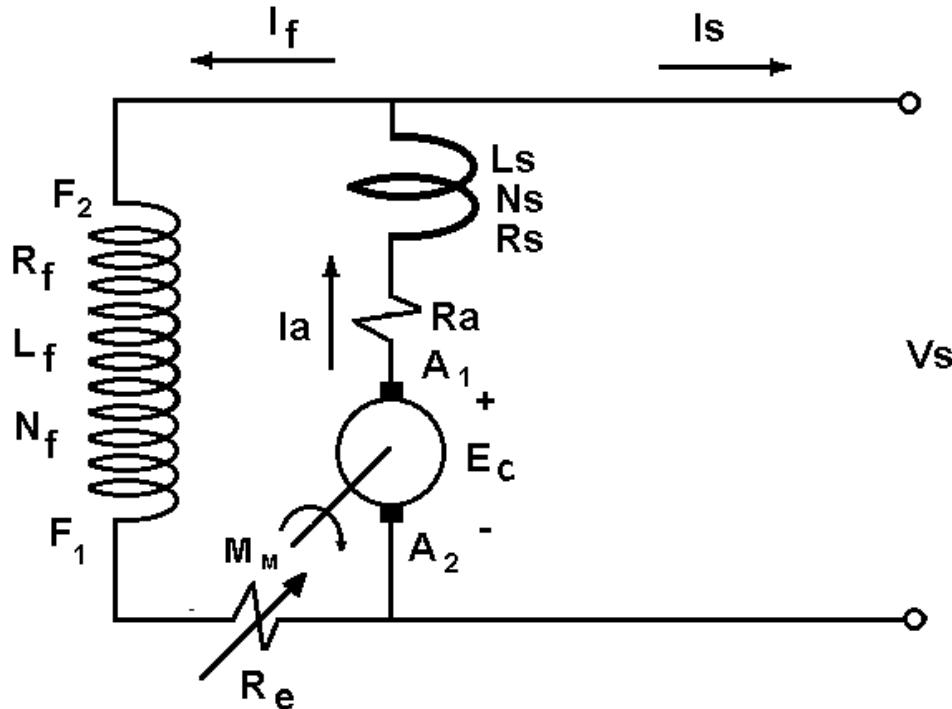
- Aprovecha las ventajas del Shunt y del serie
- Debe conectarse en forma correcta el devanado serie.
- Existen dos configuraciones



Generador Compound Corto



Generador Compound Largo



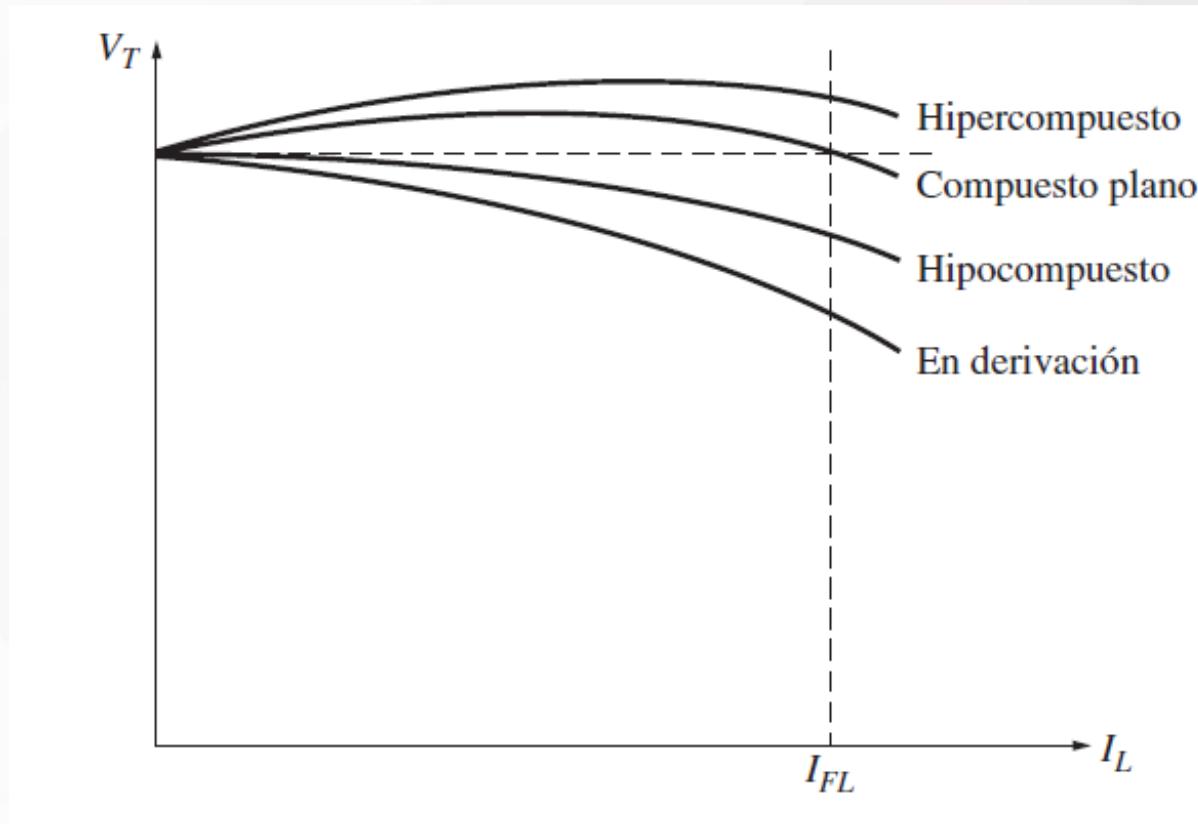
Ensayos para determinar la conexión correcta del Devanado Serie

- I.- Se dispone el generador en vacío y se mide la tensión V_s .
- Se conecta una carga ligera y se mide de nuevo $V_s' = V_s'$
- Si $V_s' > V_s$ el devanado serie estará conectado correctamente
- Si $V_s' < V_s$ el devanado serie estará conectado en forma errada

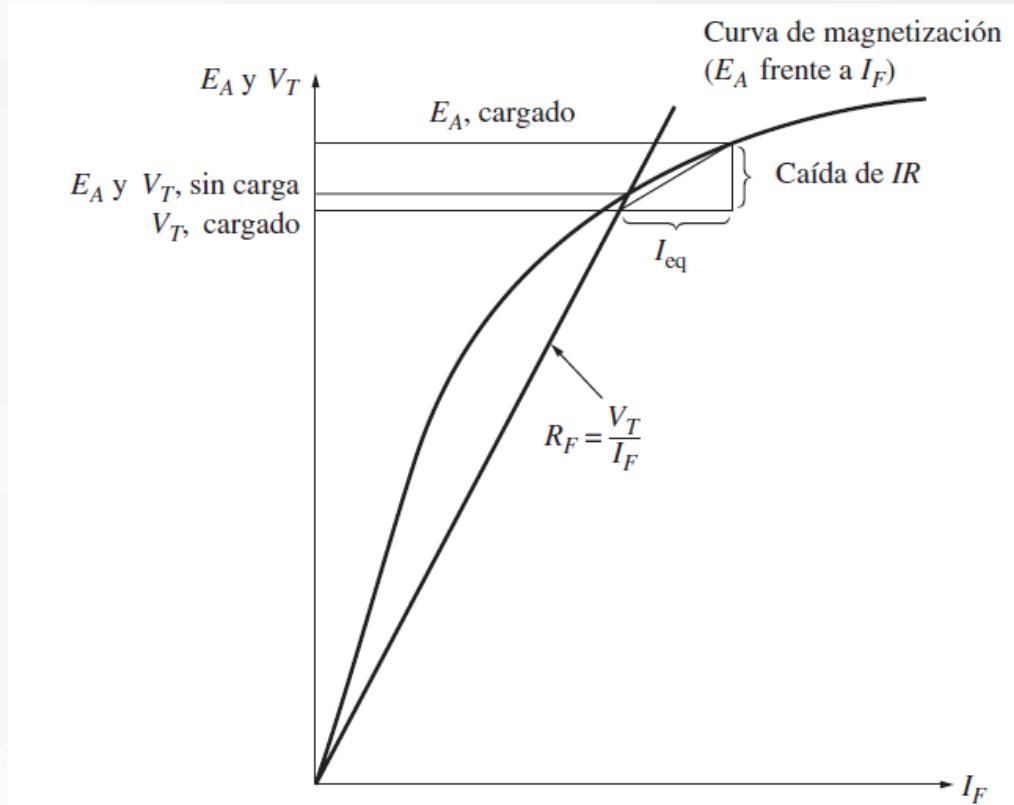
Ensayos para determinar la conexión correcta del Devanado Serie

- II Se dispone el generador con una carga Ligera y se mide Vs
- Se conecta cortocircuita el devanado serie y se mide de nuevo $V_s' = V_s'$
- Si $V_s' < V_s$, el devanado serie estará conectado correctamente
- Si $V_s' > V_s$, el devanado serie estará conectado en forma errada

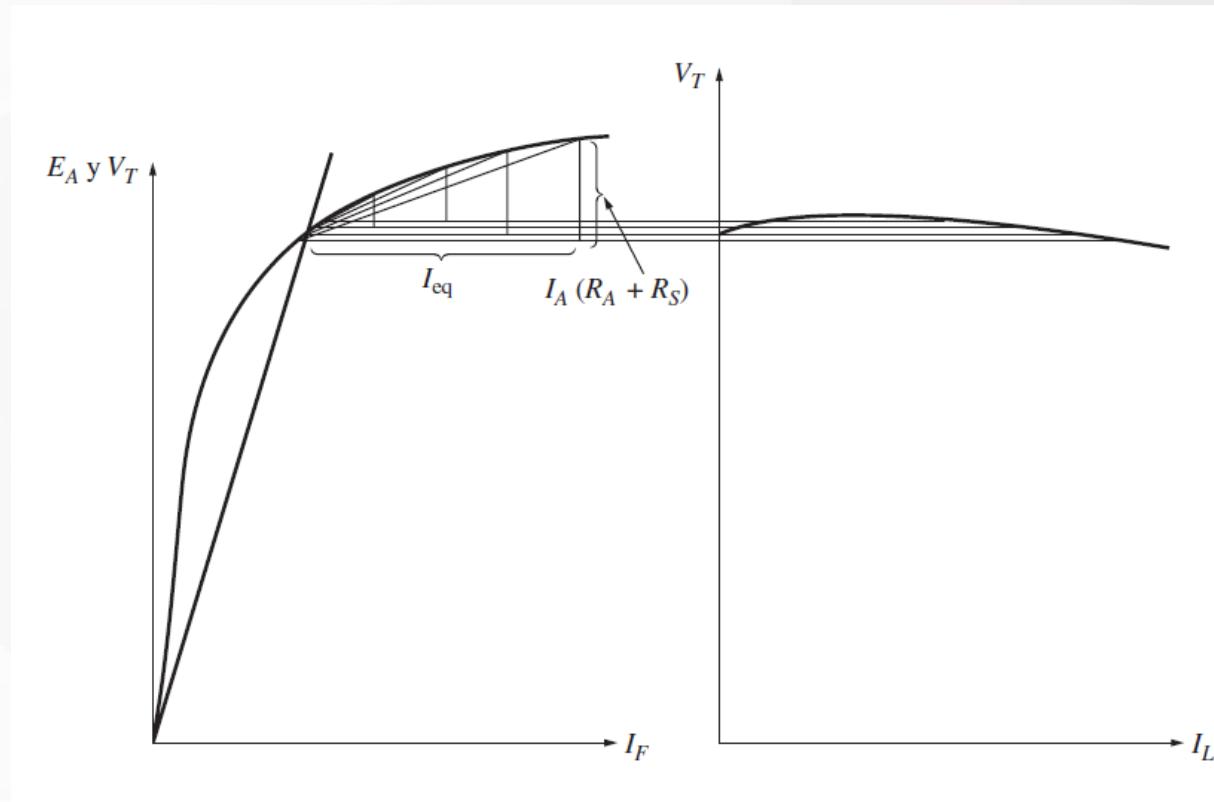
Característica Externa del Generador Compound



Característica Externa del Generador Compound

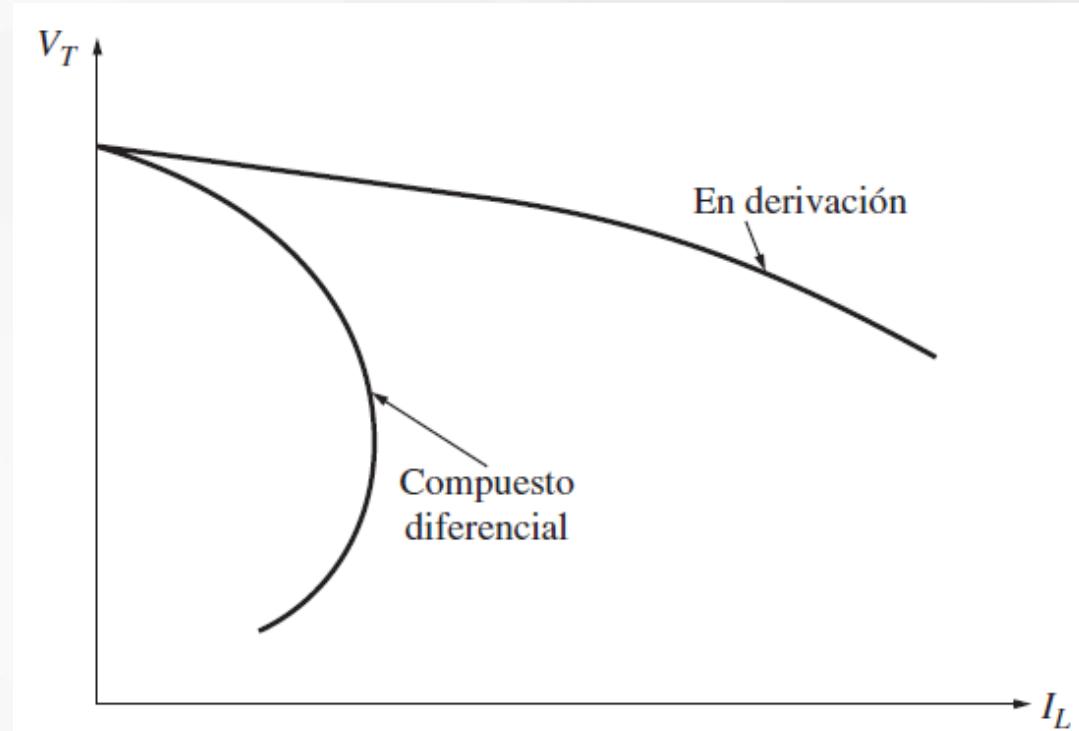


Característica Externa del Generador Compound

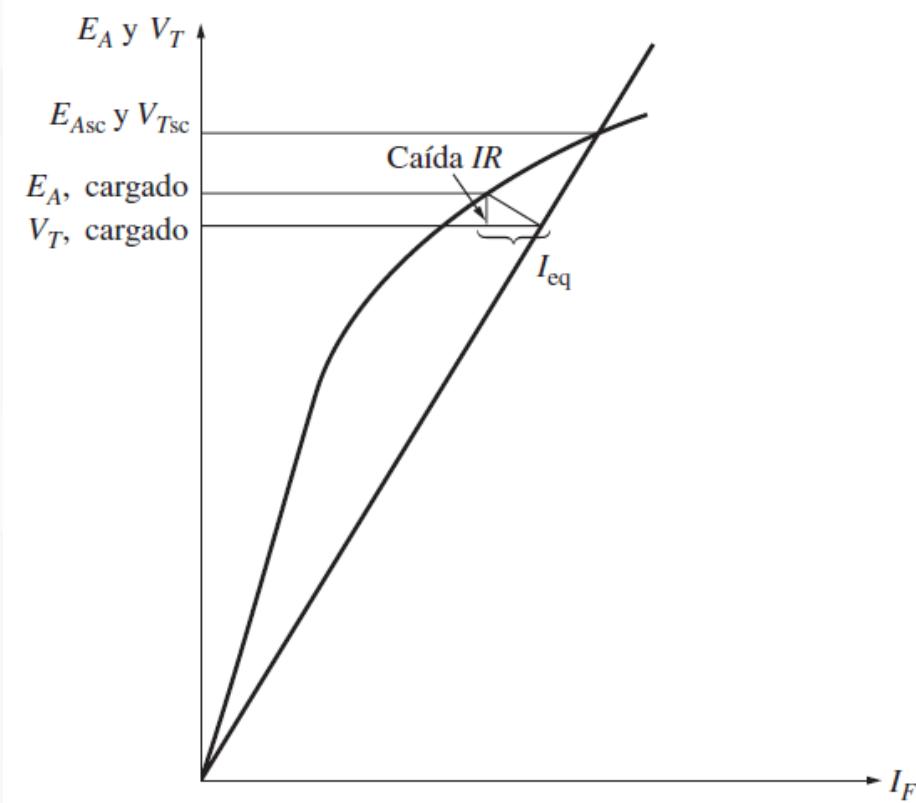


Efecto de la Reacción Inducido

$$N_f I_f^* = N_f I_f \pm N_s I_s - F_{RI}$$

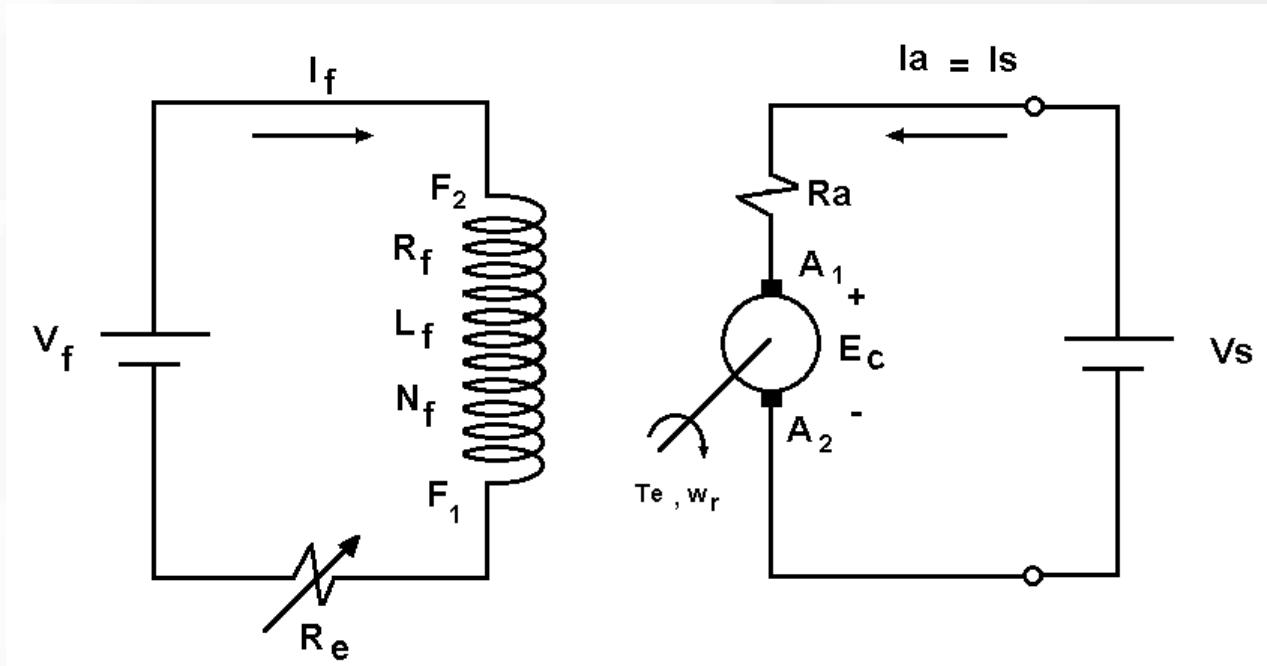


Efecto de la Reacción Inducido



Motores de Corriente Continua

- Encontrar el modelo Ecuaciones que rigen al motor de CC



Motores de Corriente Continua

$$V_f = L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} + (R_f + R_e) I_f$$

$$V_s = L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} + R_a I_a + E_c$$

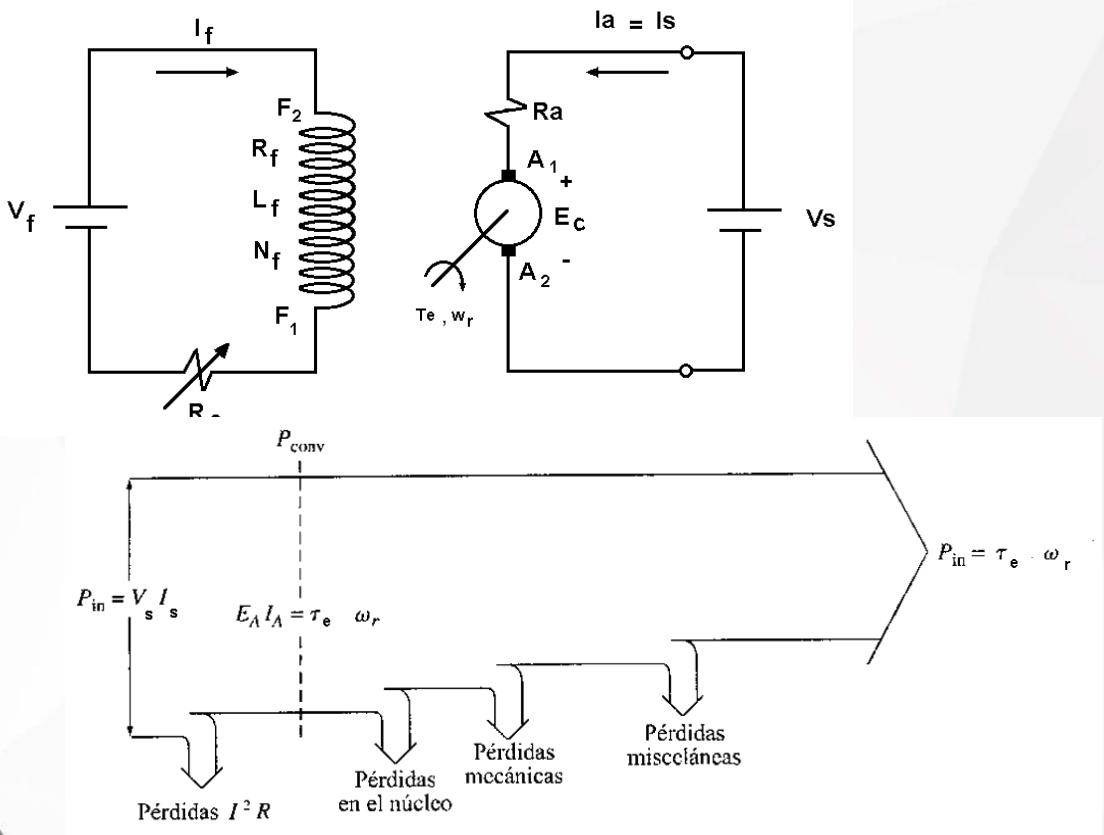
$$V_s = E_g - I_a R_a$$

$$E_c = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

$$T_e = k\Phi I_a$$

$$T_e - T_L = J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r + K_r \theta_r$$

Características Par vs Velocidad de los Motores de Corriente Continua



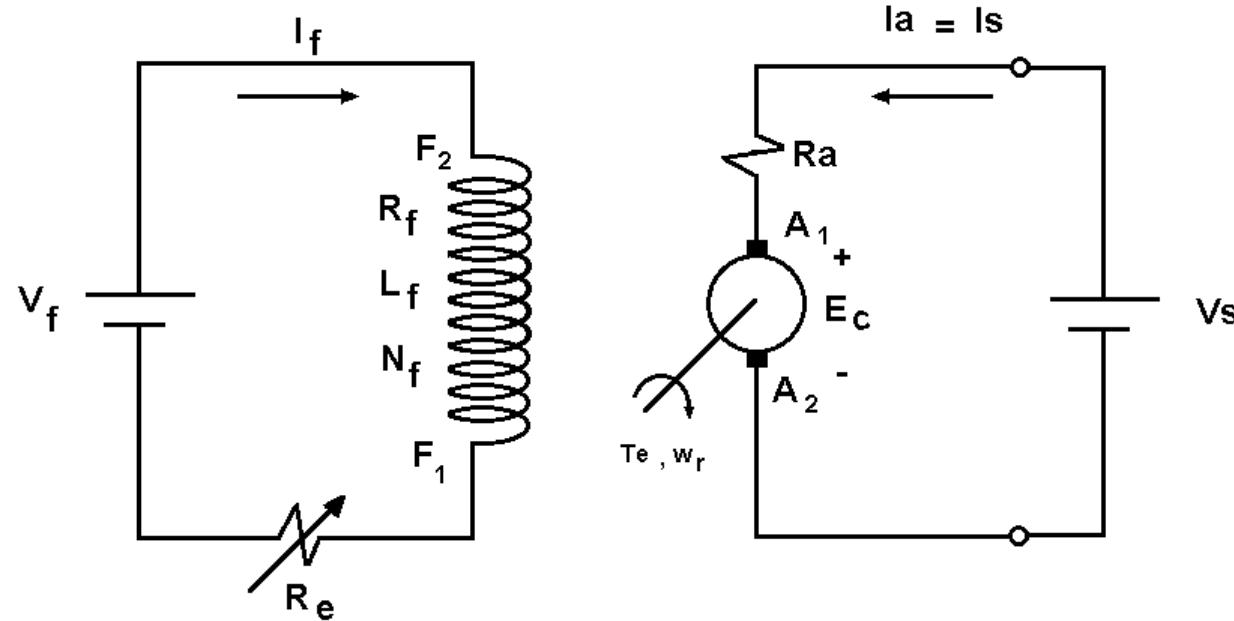
$$PT = E_c * I_a$$

$$PT = \tau_e * \omega_r$$

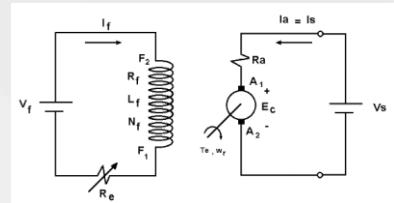
$$\frac{n_{r0}}{n_{r1}} = \frac{E_{c0}}{E_{c1}}$$

$$V_s = I_a * R_a + E_c$$

Modelo Matemático del Motor de Corriente Continua



Modelo Matemático del Motor de Corriente Continua



$$V_f = L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} + (R_f + R_e) I_f$$

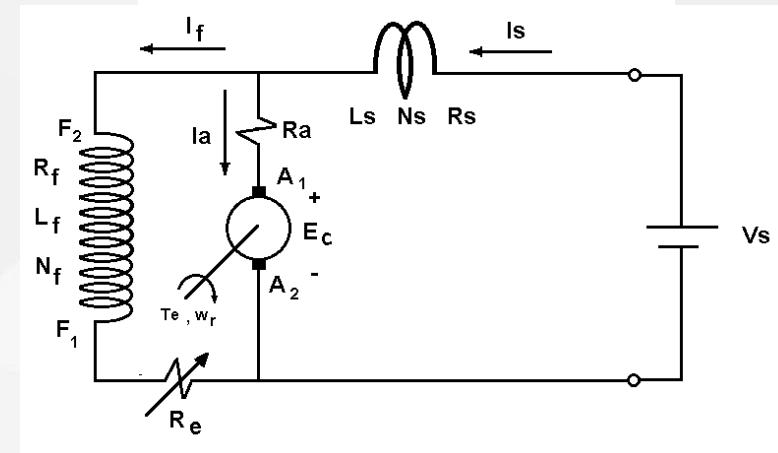
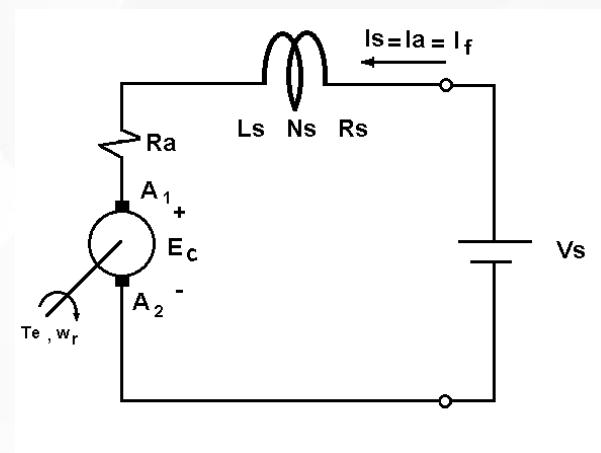
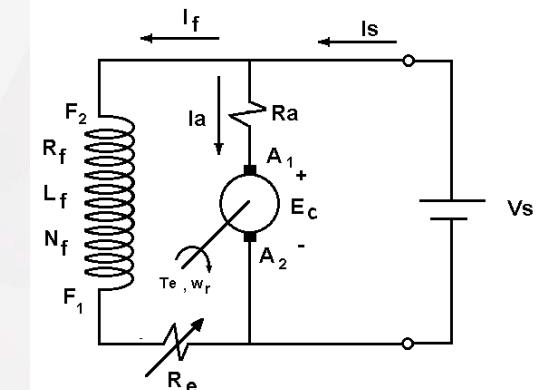
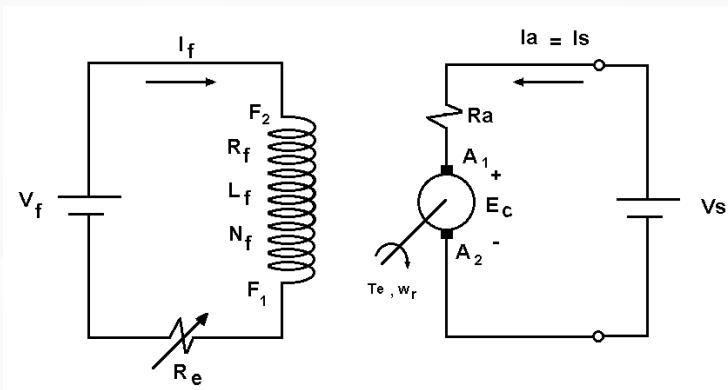
$$V_s = L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} + R_a I_a + E_c$$

$$E_c = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

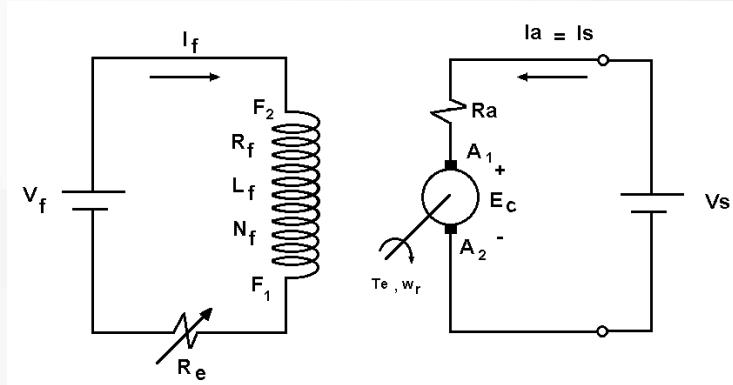
$$T_e = k\Phi I_a$$

$$T_e - T_L = J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r + K_r \theta_r$$

Tipos de Motores de Corriente Continua



Modelo Matemático del Motor de CC



$$V_f = L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} + (R_f + R_e) I_f$$

$$V_s = L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} + R_a I_a + E_c$$

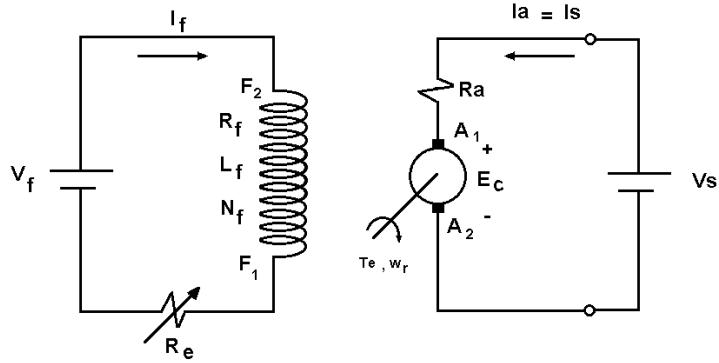
$$E_c = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

$$T_e = k\Phi I_a$$

$$T_e - T_L = J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r + K_r \theta_r$$

Modelo Matemático del Motor de CC

Asumiendo $T_L = 0$, $K_r = 0$, $I_f = Kte$



$$V_f = L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} + (R_f + R_e) I_f$$

$$V_s = L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} + R_a I_a + E_c$$

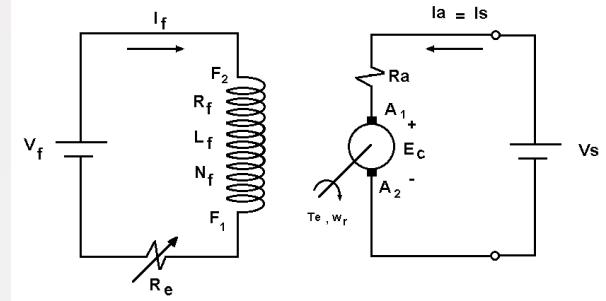
$$E_c = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases}$$

$$T_e = k\Phi I_a$$

$$T_e = J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r$$

Modelo Matemático del Motor de CC

Aplicando la Transformada de La Place



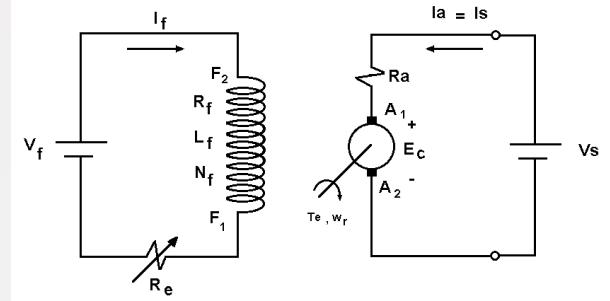
$$V_s(s) = sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases} \quad T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$T_e(s) = sJ\omega_r(s) + B_r\omega_r(s)$$

Modelo Matemático del Motor de CC

Aplicando la Transformada de La Place

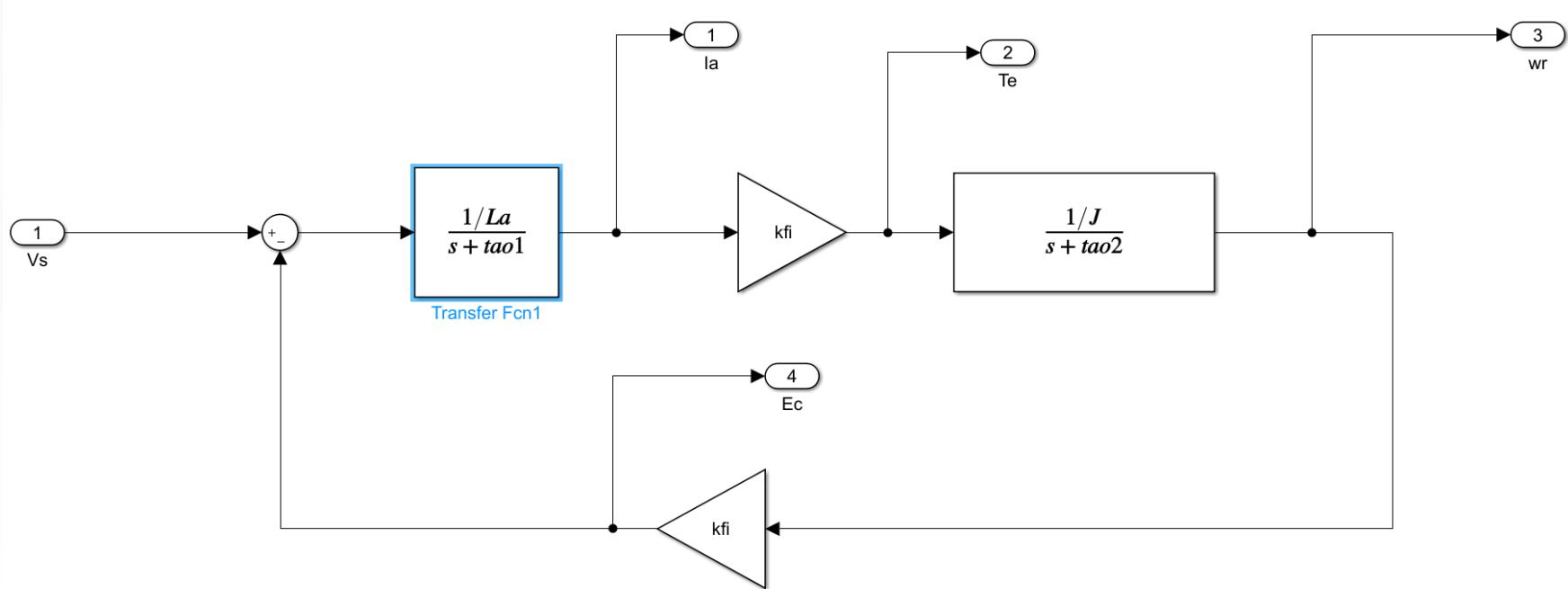


$$I_a(s) = \frac{(V_s - E_c)}{(sL_a + R_a)} = (V_s - E_c) \frac{\left(\frac{1}{L_a}\right)}{(s + \tau_1)} \quad \Delta \quad \tau_1 = \frac{R_a}{L_a}$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases} \quad T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$\omega_r(s) = \frac{T_e(s)}{(sJ + B)} = T_e(s) \frac{\left(\frac{1}{J}\right)}{(s + \tau_2)} \quad \Delta \quad \tau_2 = \frac{B}{J}$$

Modelo Matemático del Motor de CC



Modelo Matemático del Motor de CC

➤ Funciones de Transferencia

$$V_s(s) = sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases}$$

$$T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$T_e(s) = sJ\omega_r(s) + B_r\omega_r(s)$$

$$T_e(s) = \omega_r(s)(sJ + B_r)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = k\Phi\omega_r(s)$$

$$I_a(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}$$

$$V_s(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + k\Phi\omega_r(s)$$

$$V_s(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + k\Phi \frac{T_e(s)}{(sJ + B_r)}$$

$$\frac{T_e(s)}{V_s(s)} = \frac{k\Phi(sJ + B_r)}{(sL_a + R_a)(sJ + B_r) + (k\Phi)^2}$$

Modelo Matemático del Motor de CC

➤ Funciones de Transferencia

$$V_s(s) = sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases}$$

$$T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$T_e(s) = sJ\omega_r(s) + B_r\omega_r(s)$$

$$T_e(s) = \omega_r(s)(sJ + B_r)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = k\Phi\omega_r(s)$$

$$I_a(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}$$

$$V_s(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + k\Phi\omega_r(s)$$

$$V_s(s) = \frac{\omega_r(s)(sJ + B_r)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + k\Phi\omega_r(s)$$

$$\frac{\omega_r(s)}{V_s(s)} = \frac{k\Phi}{(sL_a + R_a)(sJ + B_r) + (k\Phi)^2}$$

Modelo Matemático del Motor de CC

➤ Funciones de Transferencia

$$V_s(s) = sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases}$$

$$T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$T_e(s) = sJ\omega_r(s) + B_r\omega_r(s)$$

$$T_e(s) = \omega_r(s)(sJ + B_r)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = k\Phi\omega_r(s)$$

$$I_a(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}$$

$$V_s(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = \frac{E_c(s)(sJ + B_r)}{k\Phi}(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = \frac{\omega_r(s)(sJ + B_r)}{(k\Phi)^2}(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$\frac{E_c(s)}{V_s(s)} = \frac{(k\Phi)^2}{(sL_a + R_a)(sJ + B_r) + (k\Phi)^2}$$

Modelo Matemático del Motor de CC

➤ Funciones de Transferencia

$$V_s(s) = sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + E_c(s)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases}$$

$$T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

$$T_e(s) = sJ\omega_r(s) + B_r\omega_r(s)$$

$$T_e(s) = \omega_r(s)(sJ + B_r)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + E_c(s)$$

$$E_c(s) = k\Phi\omega_r(s)$$

$$I_a(s) = \frac{T_e(s)}{k\Phi}$$

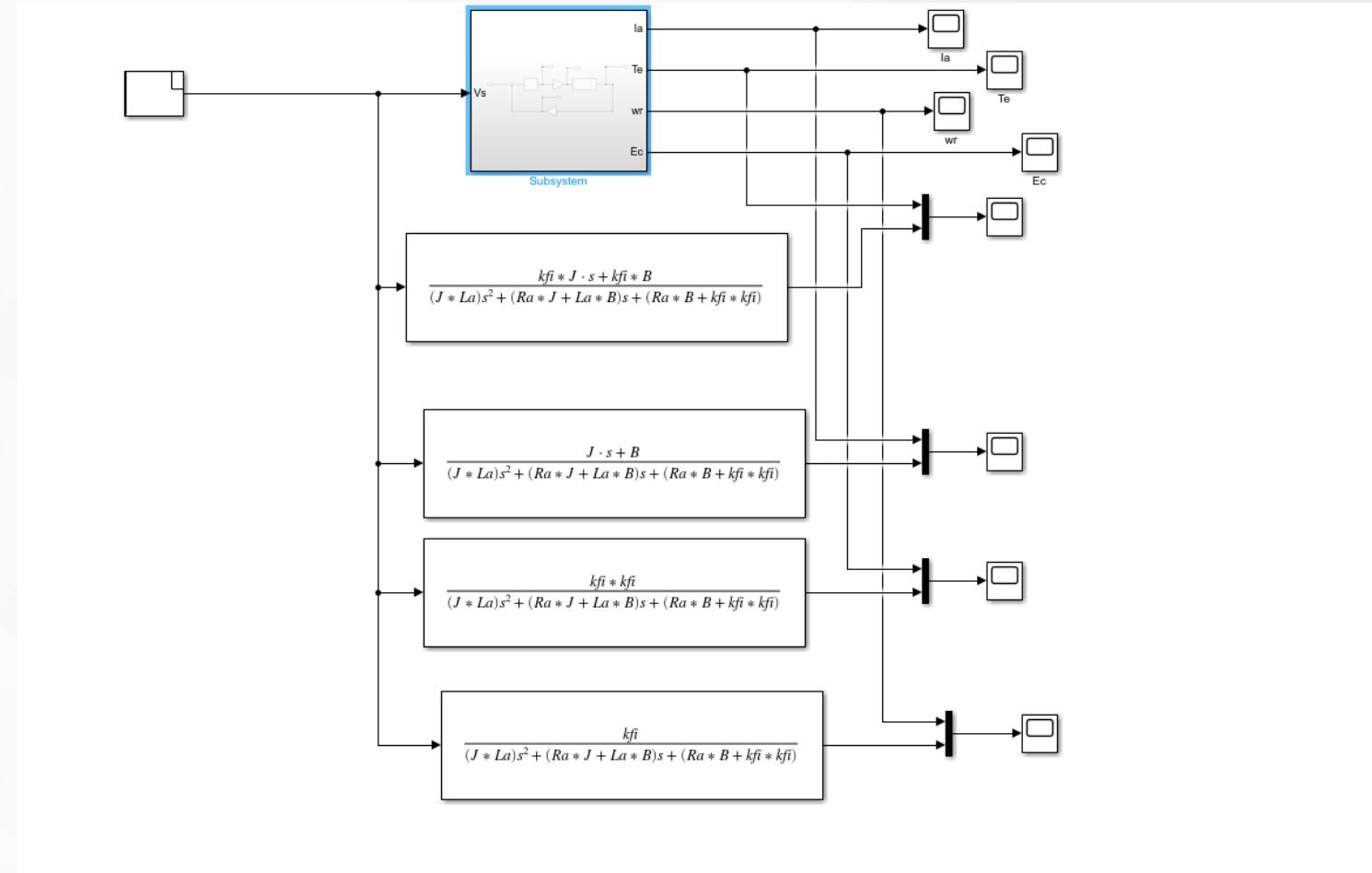
$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + k\Phi\omega_r(s)$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + k\Phi \frac{T_e(s)}{(sJ + B_r)}$$

$$V_s(s) = I_a(s)(sL_a + R_a) + \frac{(k\Phi)^2}{(sJ + B_r)}$$

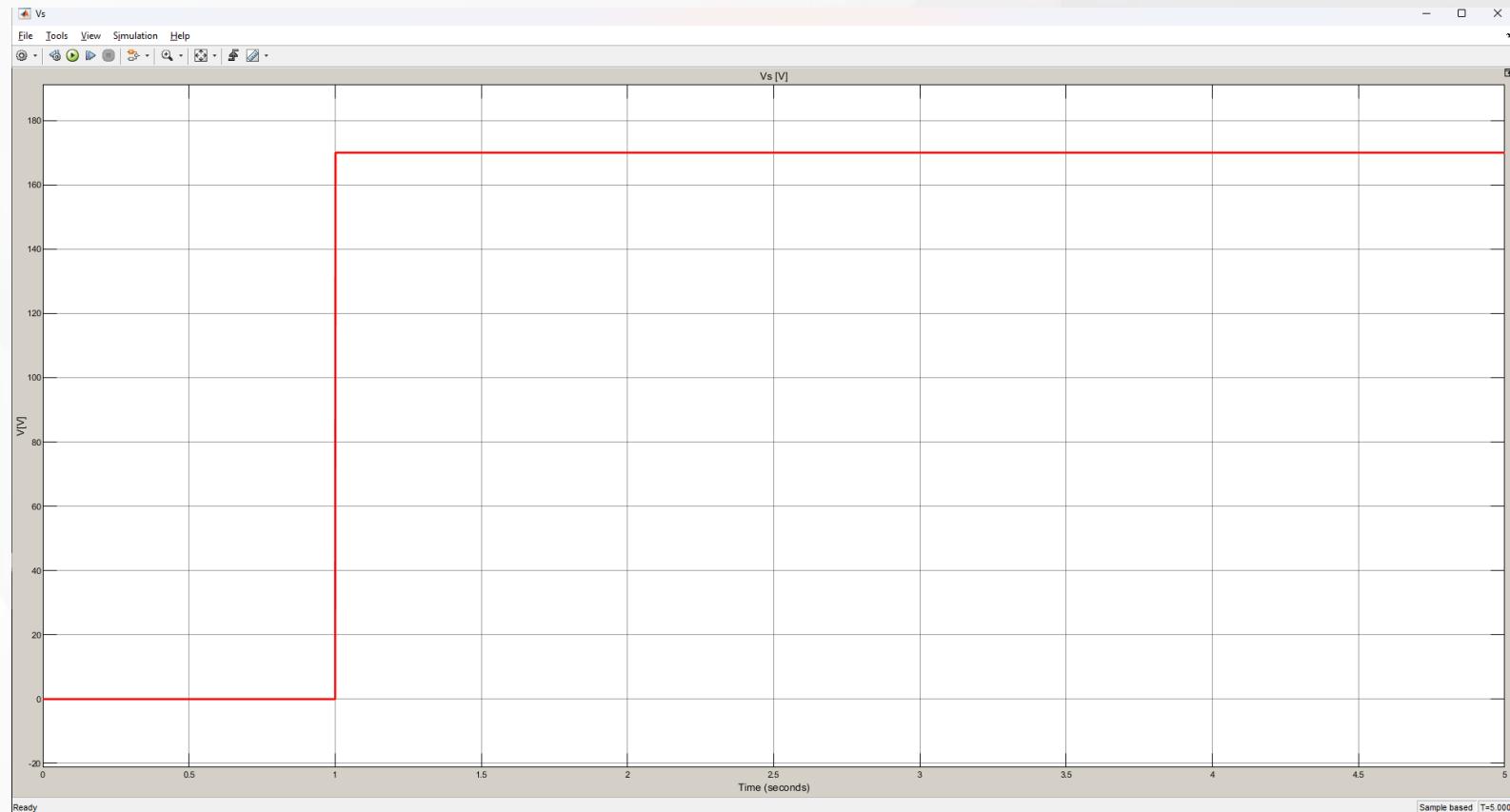
$$\frac{I_a(s)}{V_s(s)} = \frac{(sJ + B_r)}{(sL_a + R_a)(sJ + B_r) + (k\Phi)^2}$$

Modelo Matemático del Motor de CC

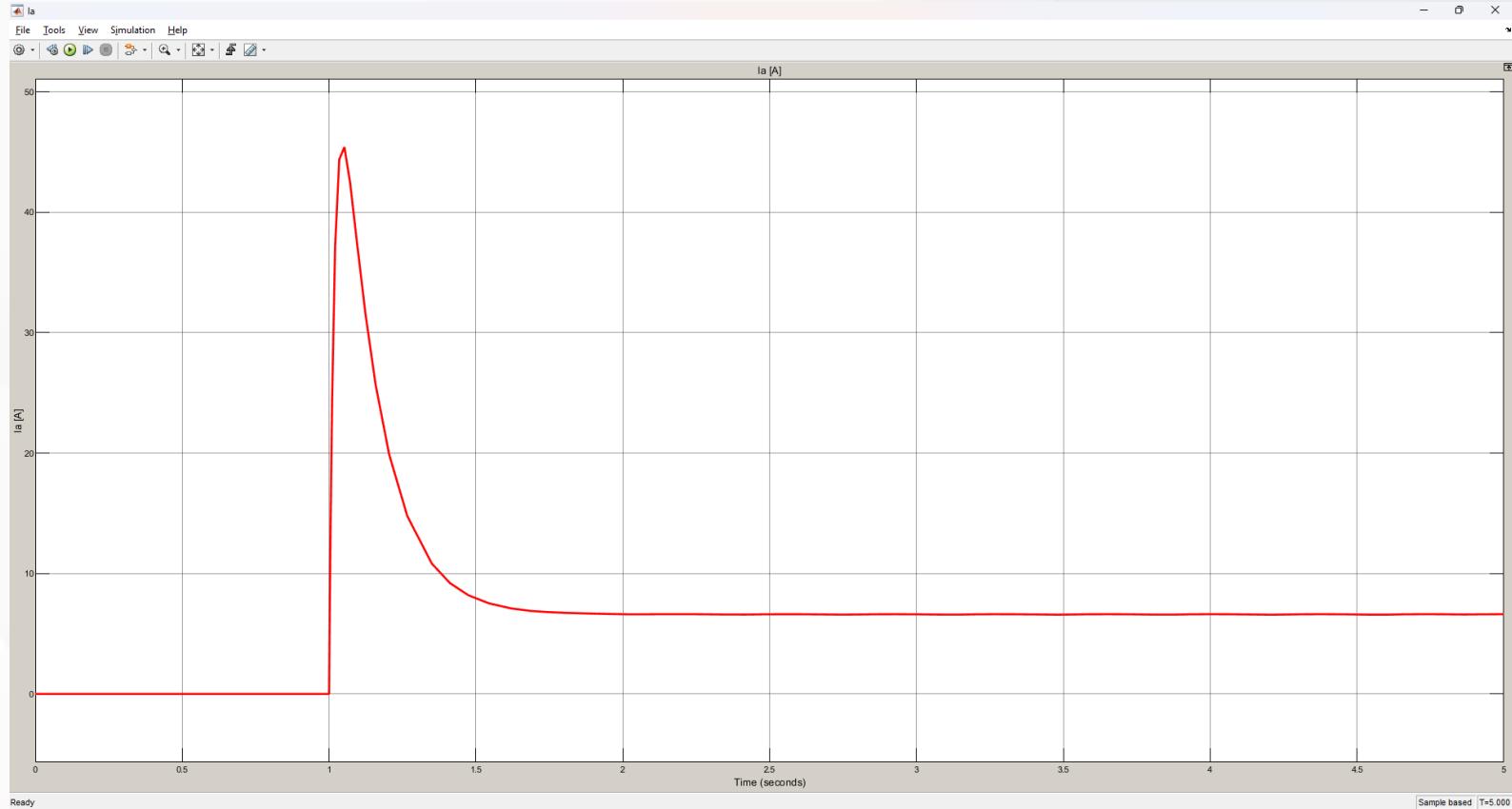


Modelo Matemático del Motor de CC

V_s

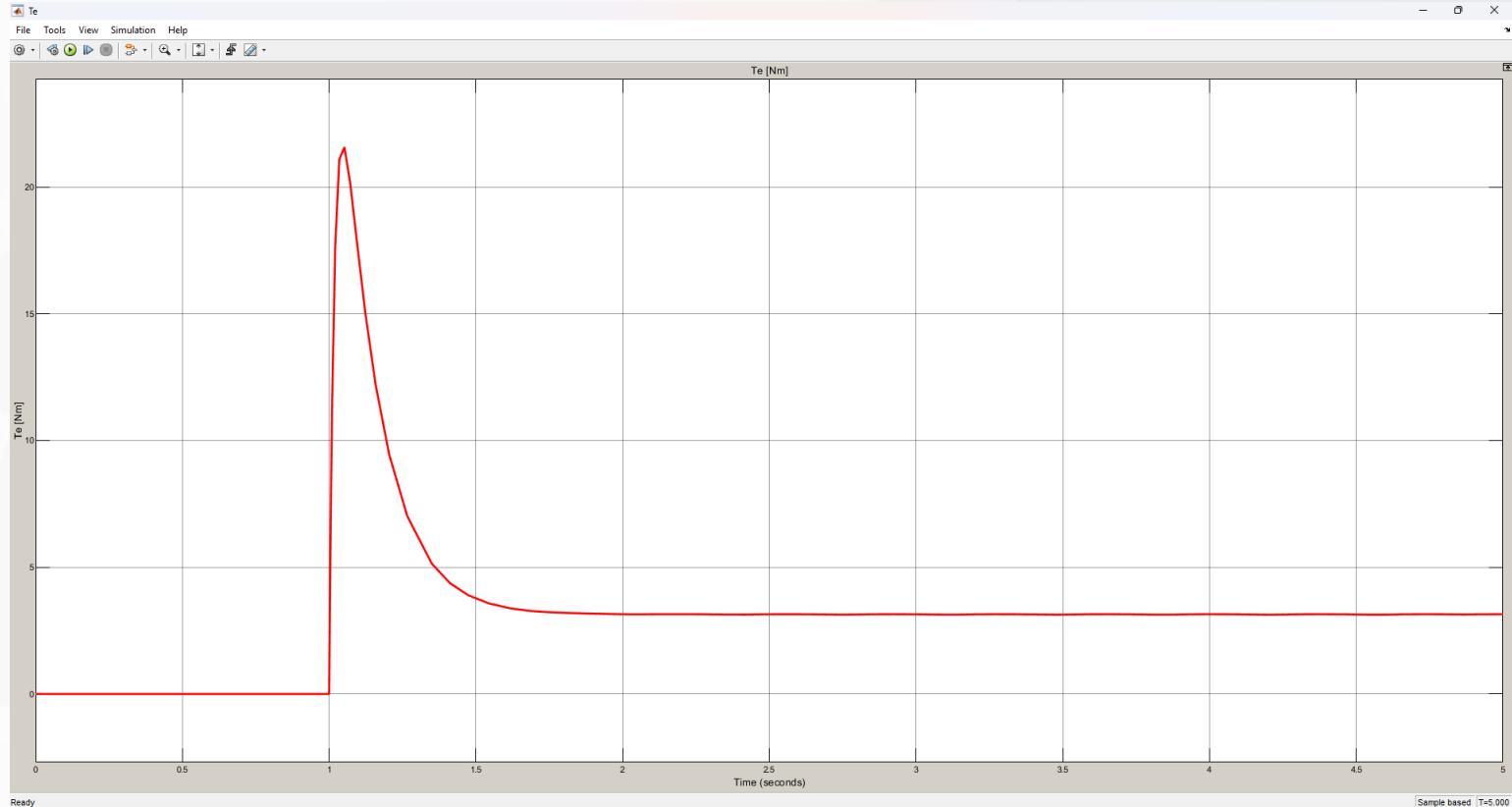


Modelo Matemático del Motor de CC



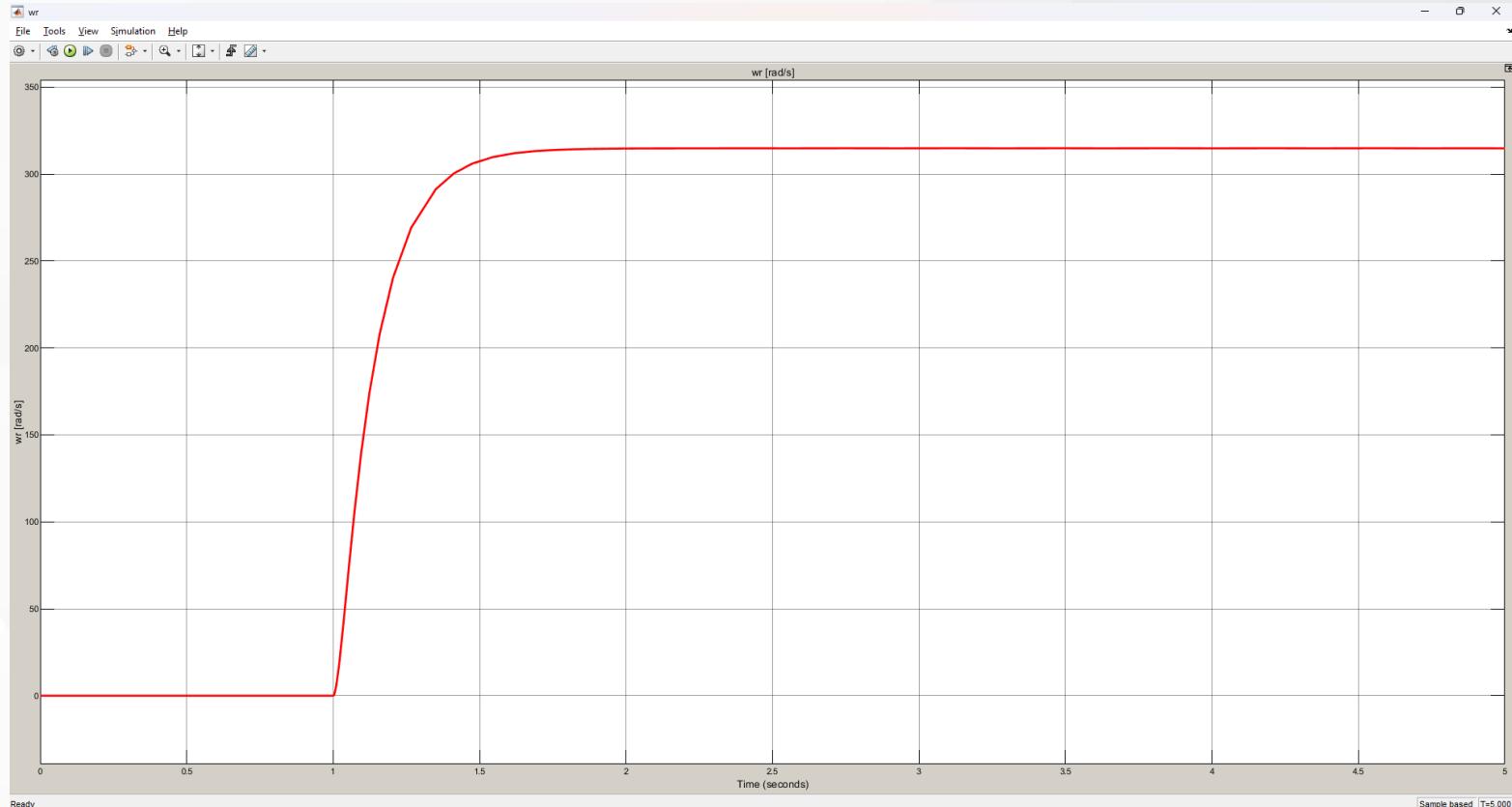
Modelo Matemático del Motor de CC

Te

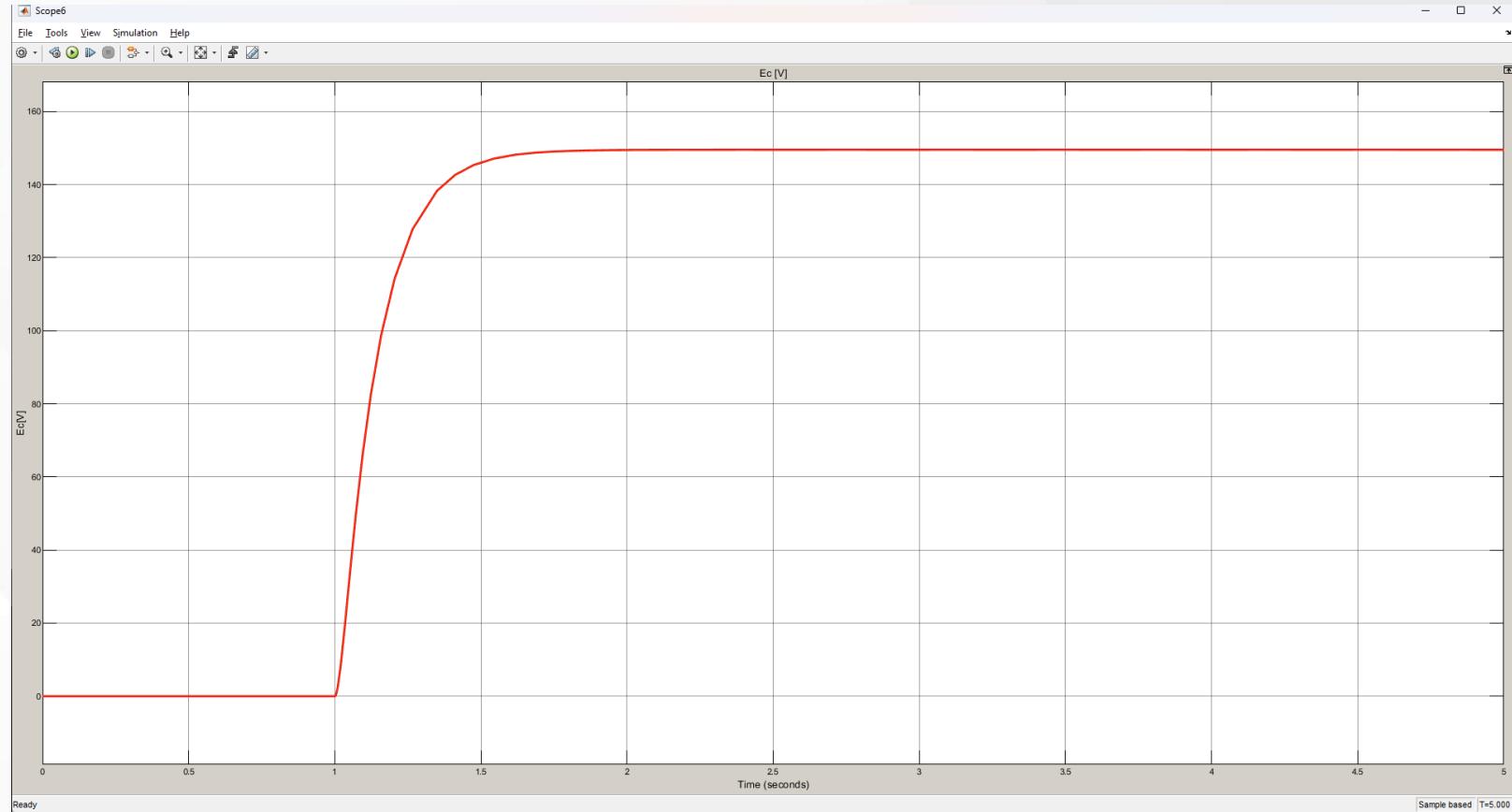


Modelo Matemático del Motor de CC

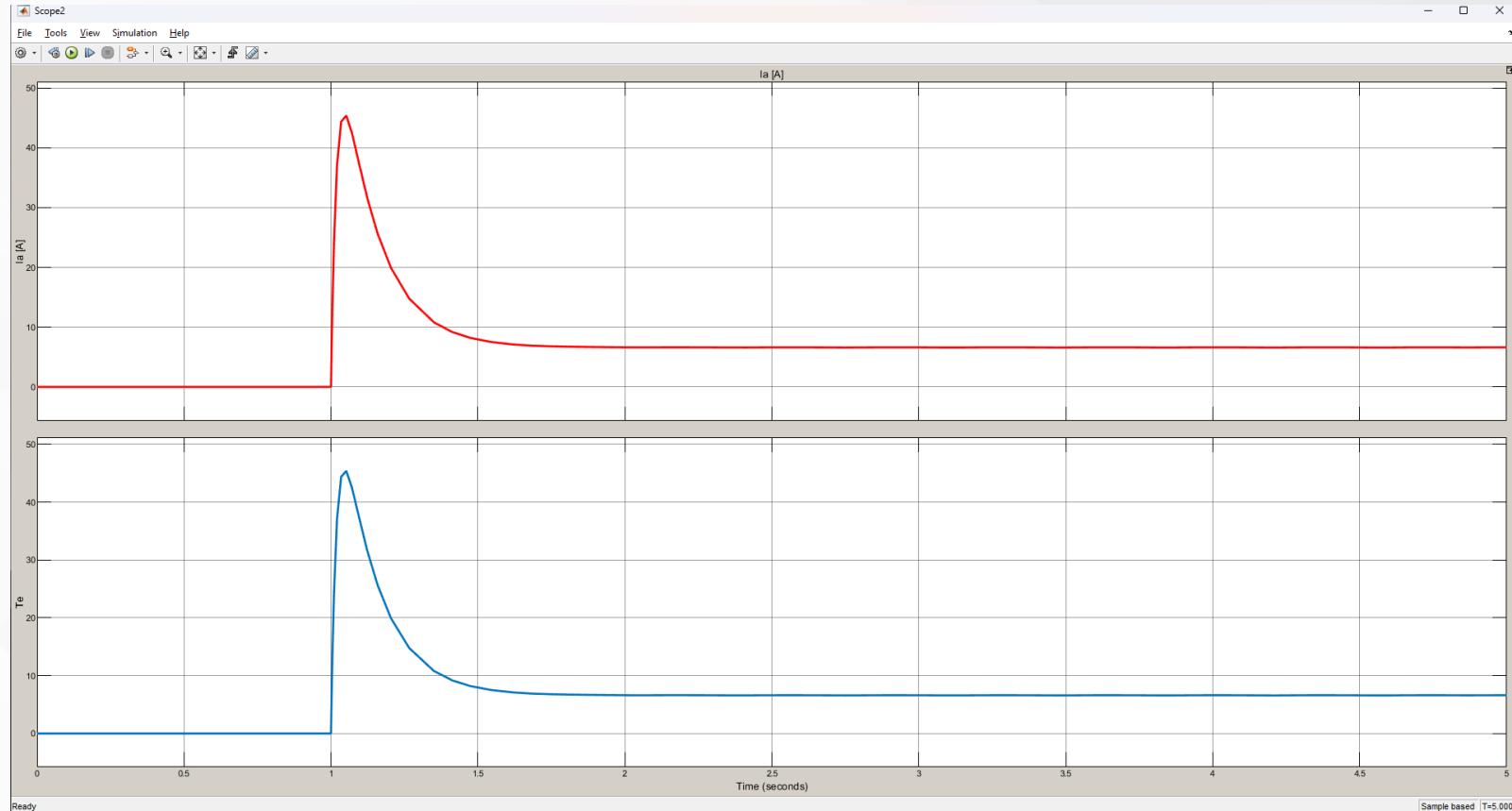
wr



Modelo Matemático del Motor de CC

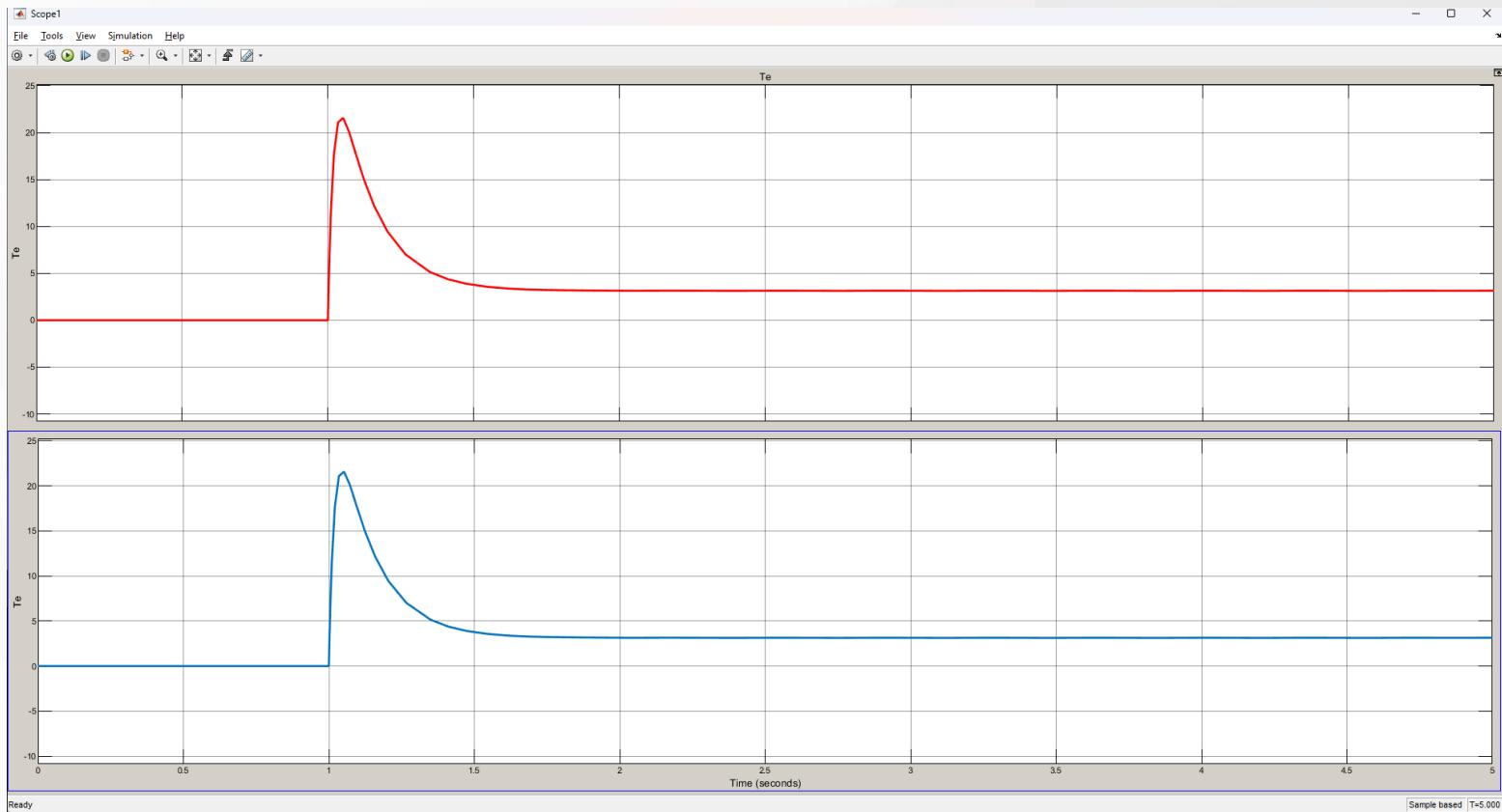


Modelo Matemático del Motor de CC



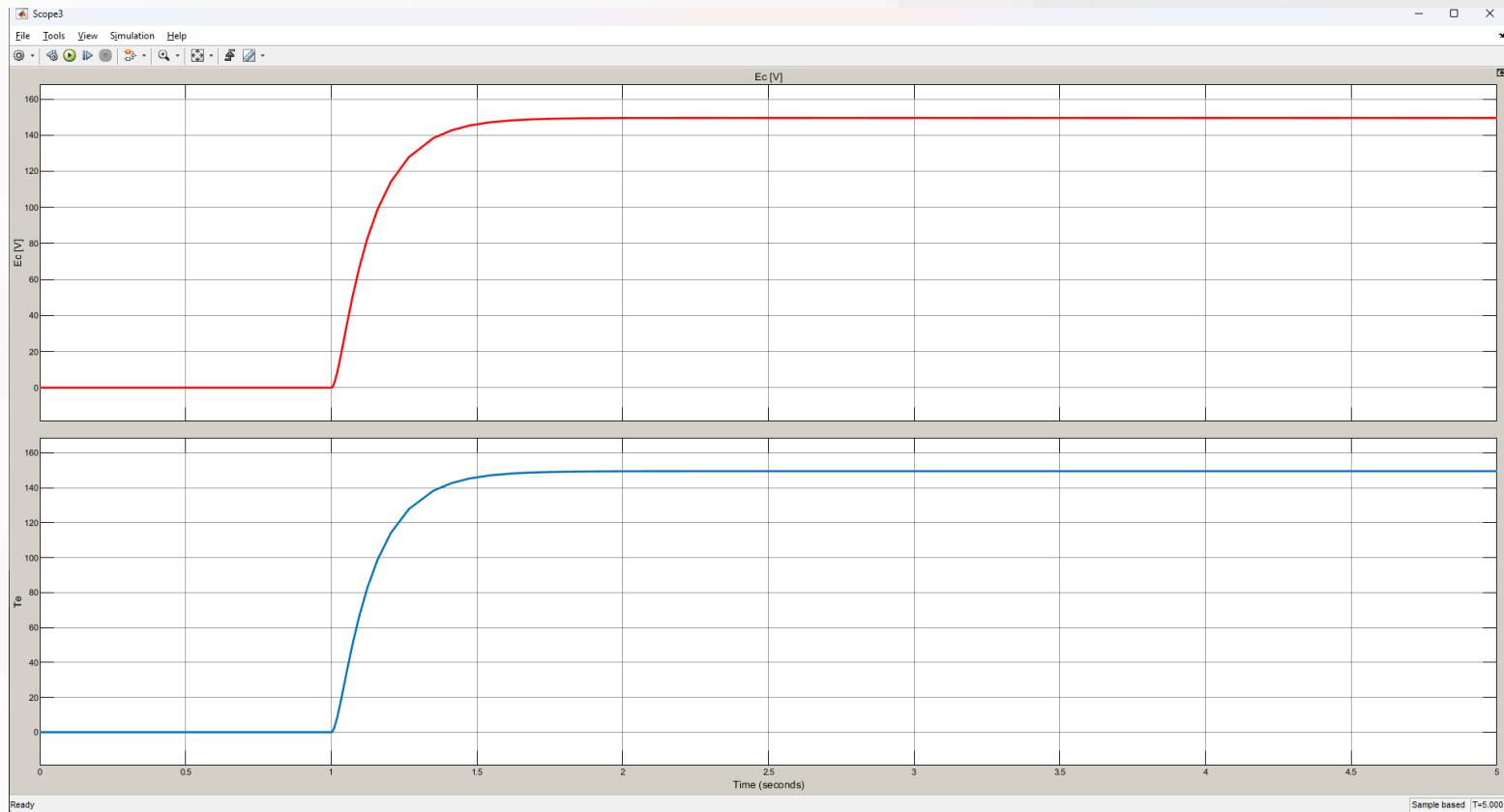
Modelo Matemático del Motor de CC

Te



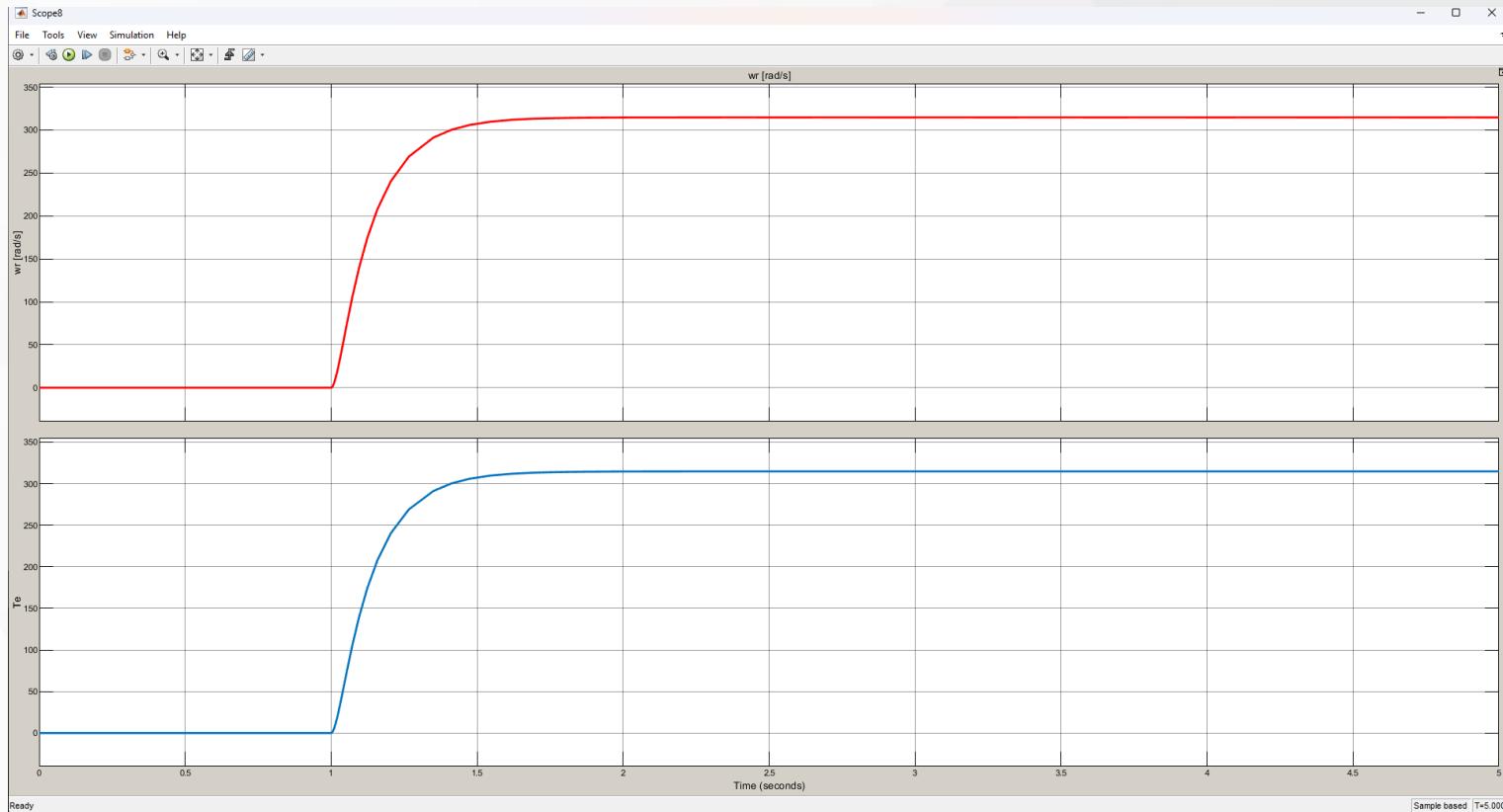
Modelo Matemático del Motor de CC

Ec



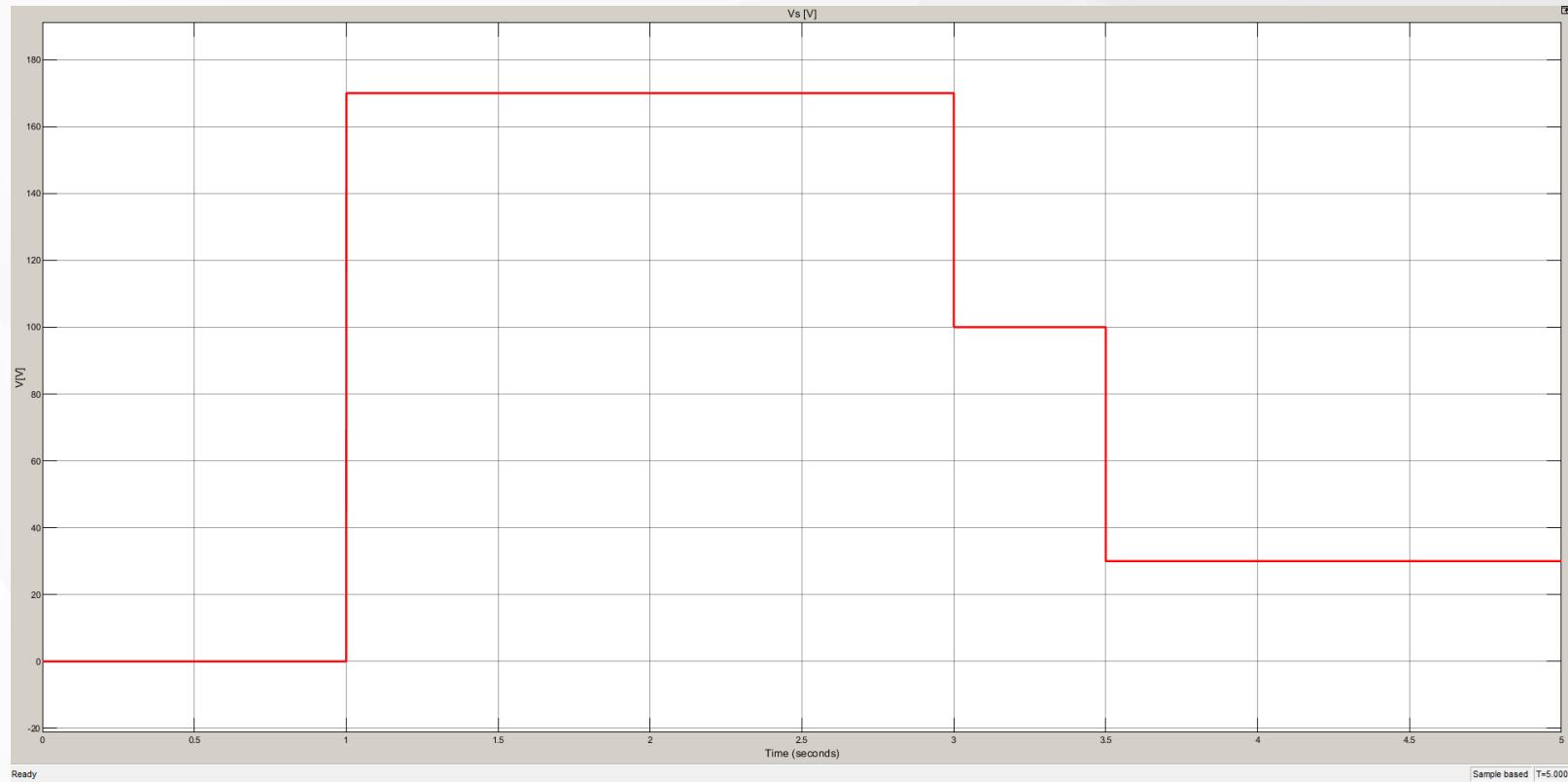
Modelo Matemático del Motor de CC

wr



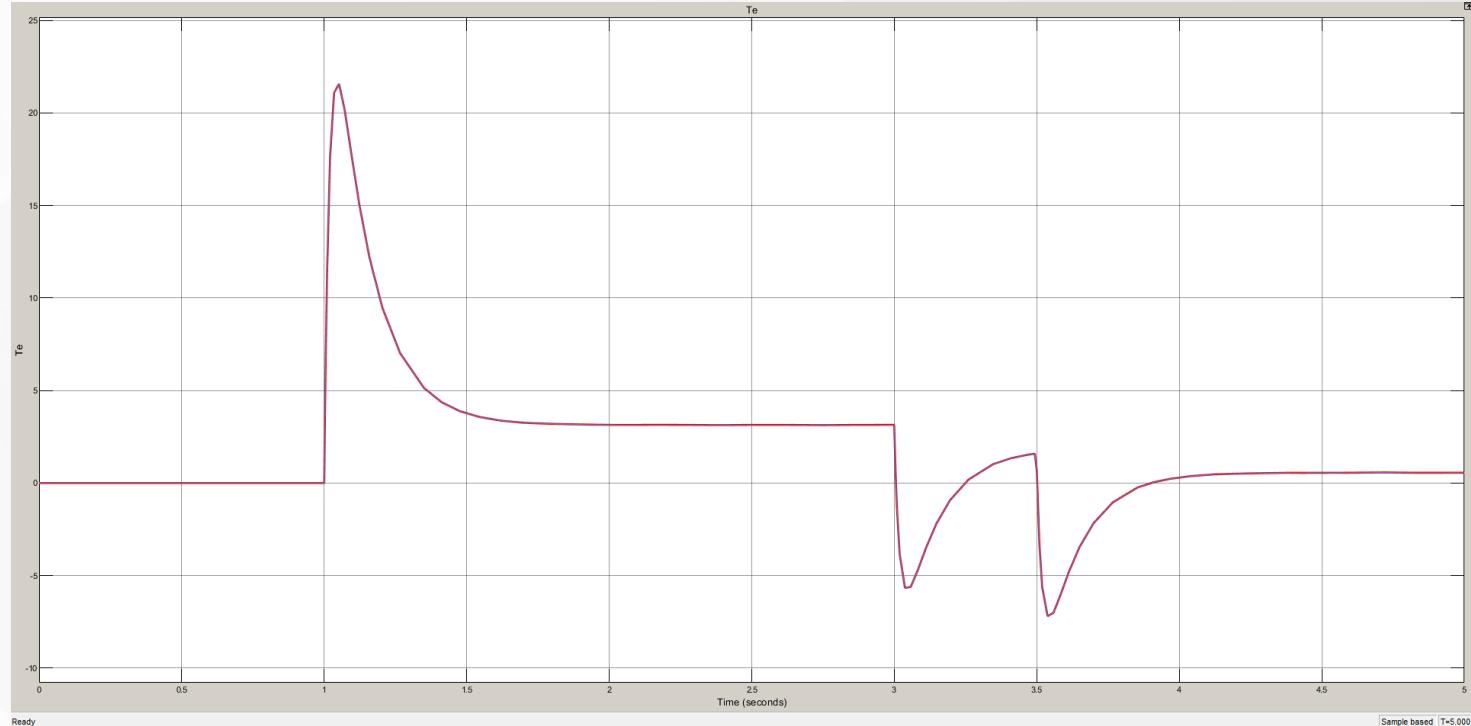
Modelo Matemático del Motor de CC

Vs



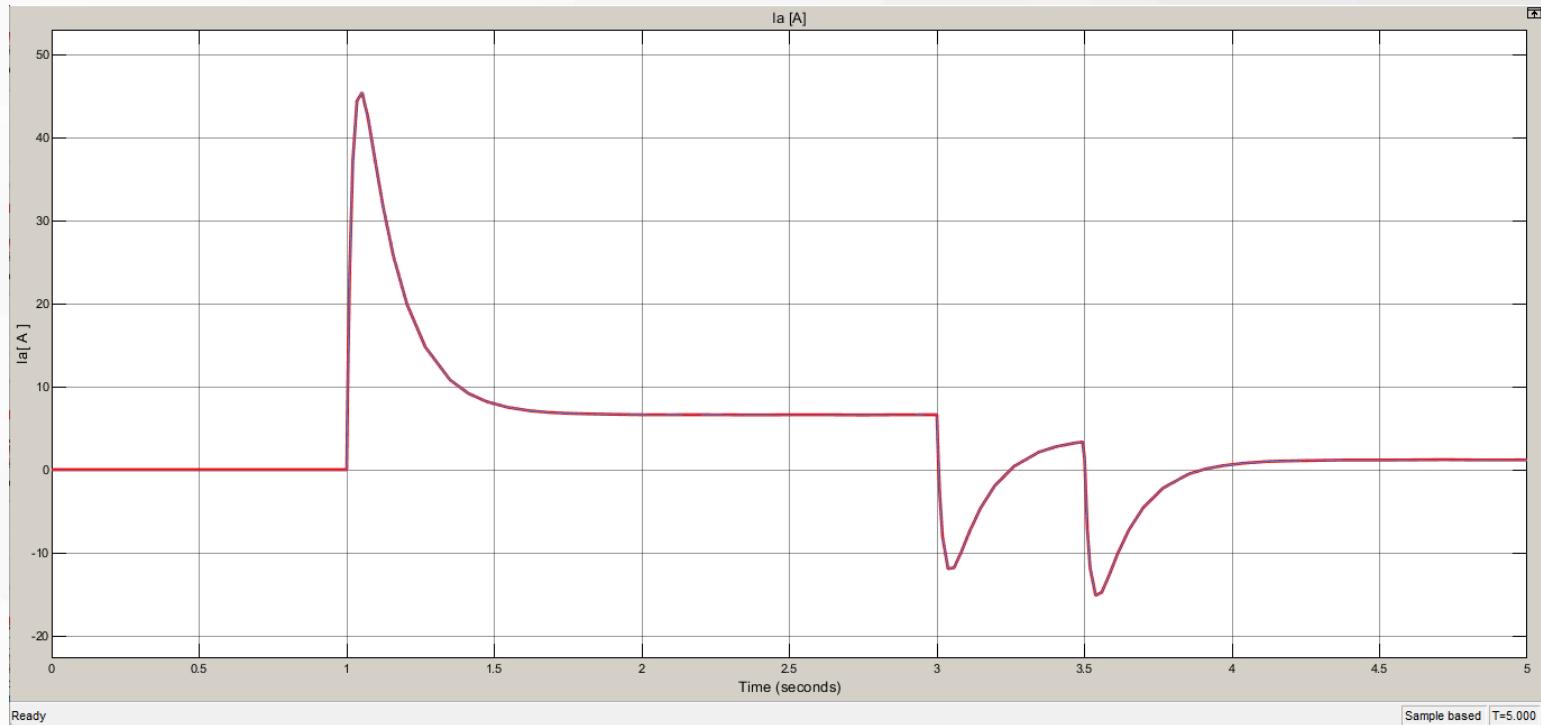
Modelo Matemático del Motor de CC

Te:



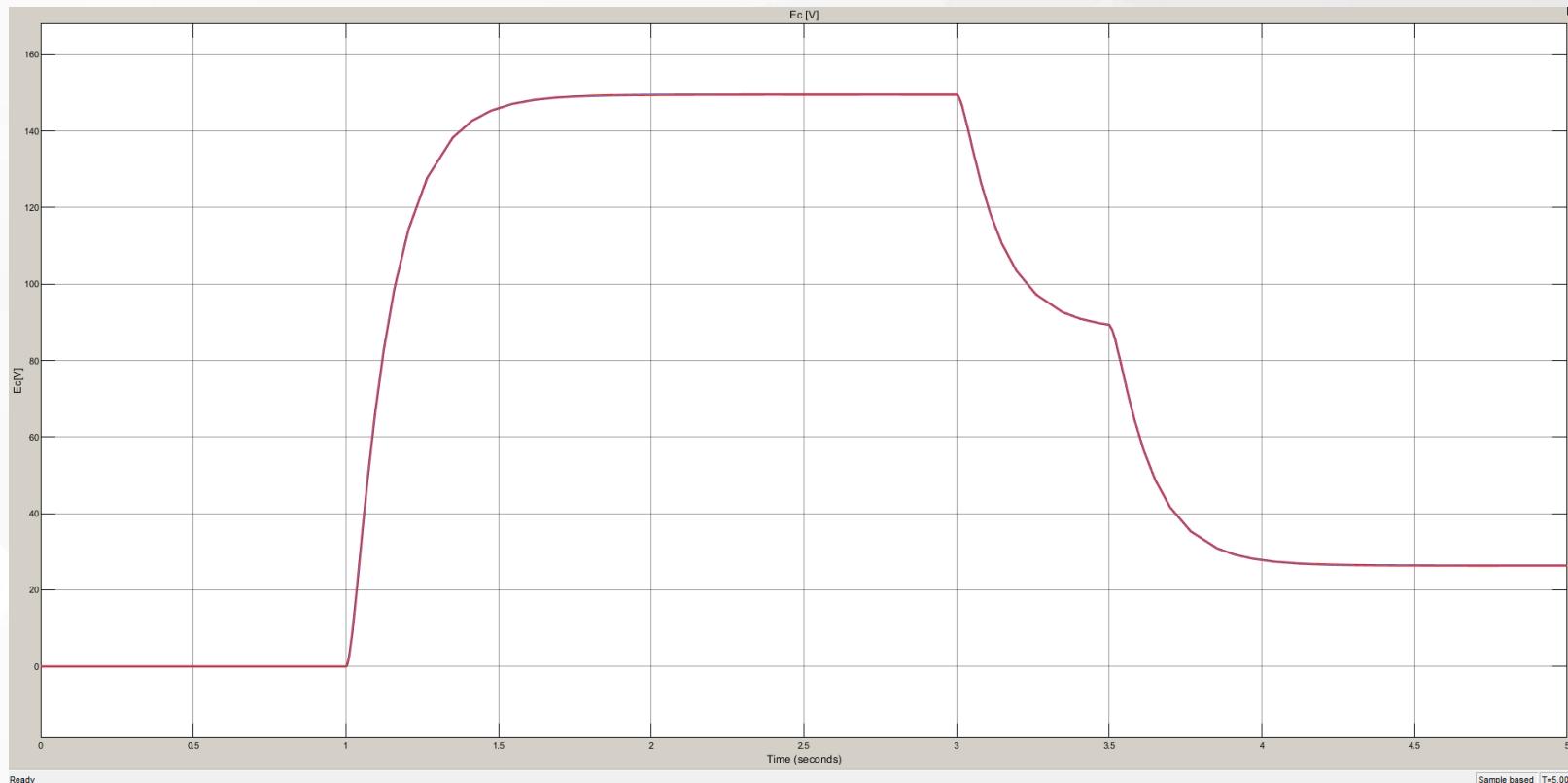
Modelo Matemático del Motor de CC

la:



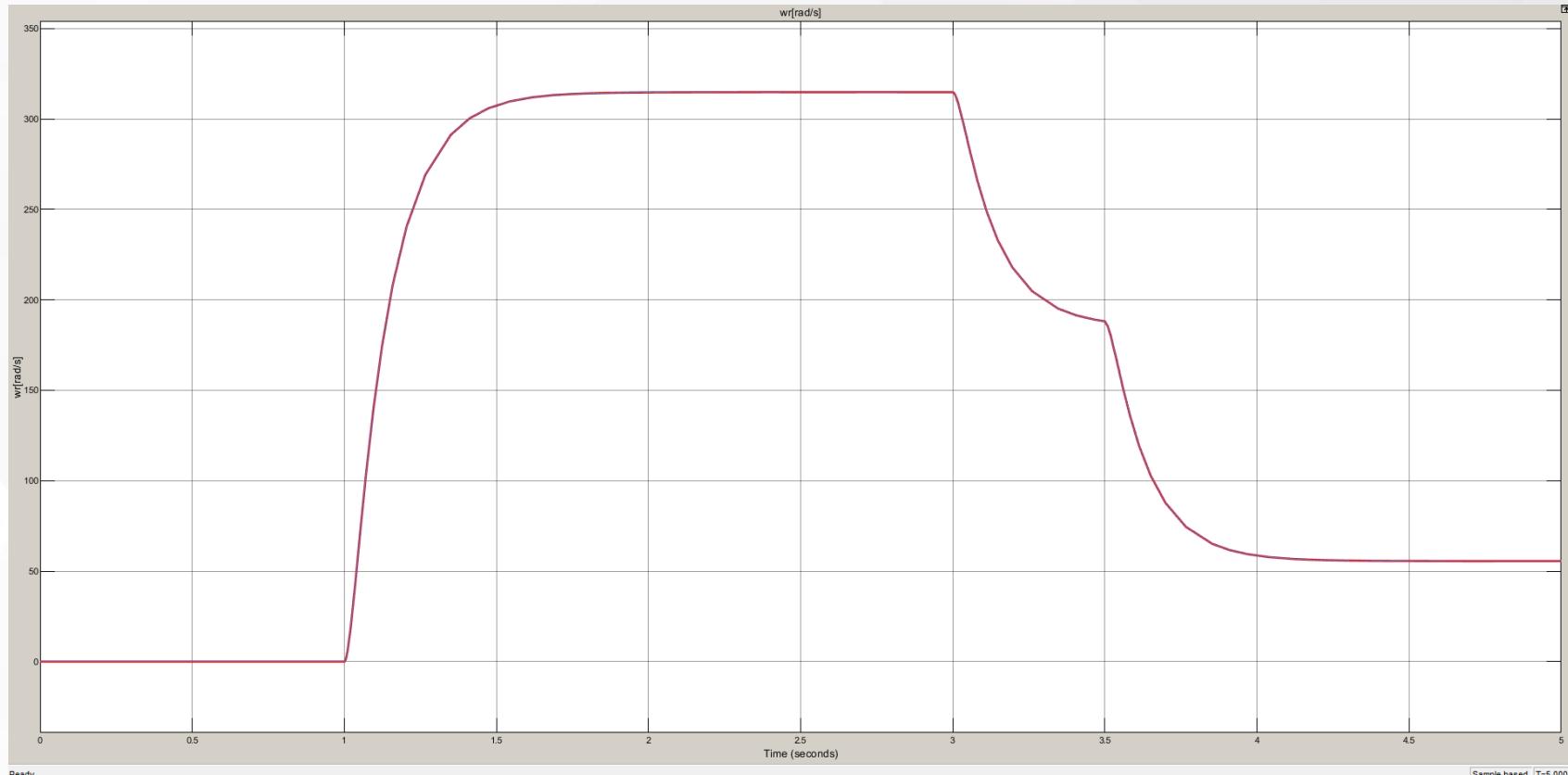
Modelo Matemático del Motor de CC

Ec:



Modelo Matemático del Motor de CC

wr:



Ready

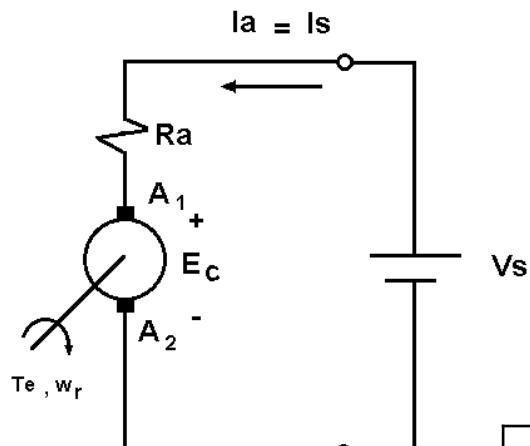
Sample based T=5.000

Obtención de Parámetros del Motor DC en forma Experimental

Cálculo de la KΦ:

$$E_c(s) = \begin{cases} k\Phi\omega_r(s) \\ k\Phi n_r(s) \end{cases}$$

- ❖ Se aplica tensión al motor
- ❖ Se mide la tensión, la Corriente y la velocidad
- ❖ Se calcula kΦ



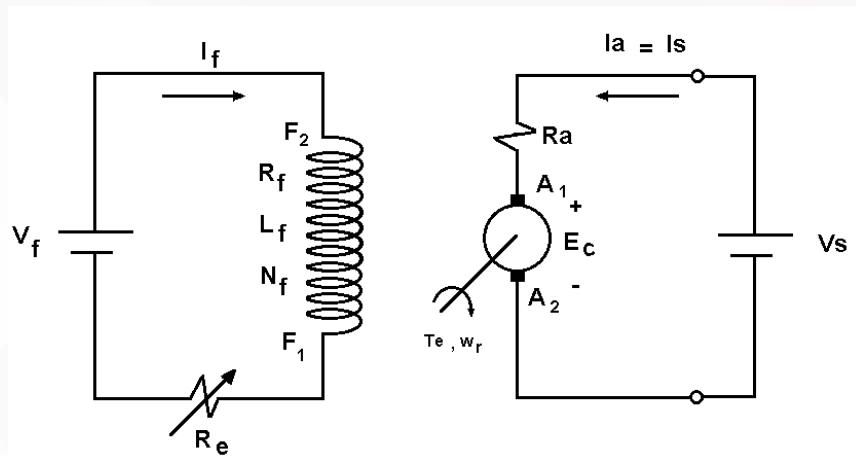
$$k\Phi = \frac{V_s - I_a R_a}{\omega_r}$$

V_s [V]	I_a [A]	ω_r [rpm]	ω_r [rad/s]

Obtención de Parámetros del Motor DC en forma Experimental

Medición de R_a , L_a :

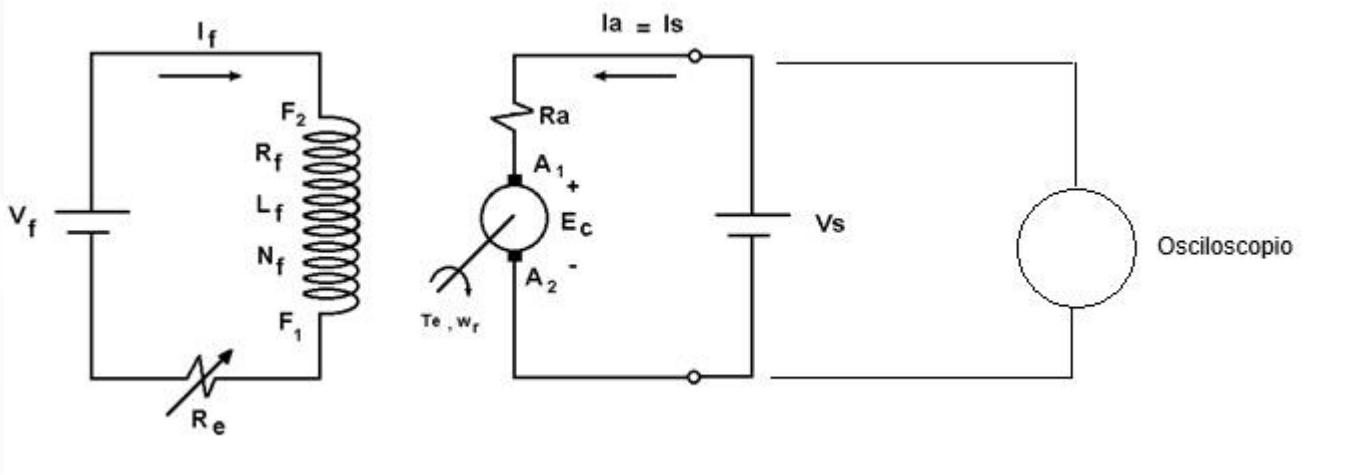
- ❖ Medir con el Voltímetro la resistencia de armadura
- ❖ Medir la Inductancia con el medidor respectivo



Obtención de Parámetros del Motor DC en forma Experimental

Medición t_m :

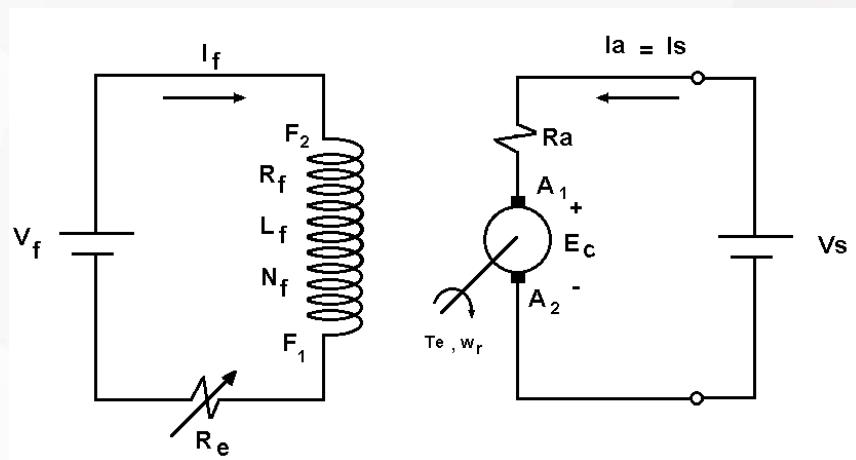
- ❖ Conectar el motor a plena tensión
- ❖ Observar la constante de tiempo utilizando un osciloscopio



Obtención de Parámetros del Motor DC en forma Experimental

Cálculo de T_e :

$$T_e(s) = k\Phi I_a(s)$$

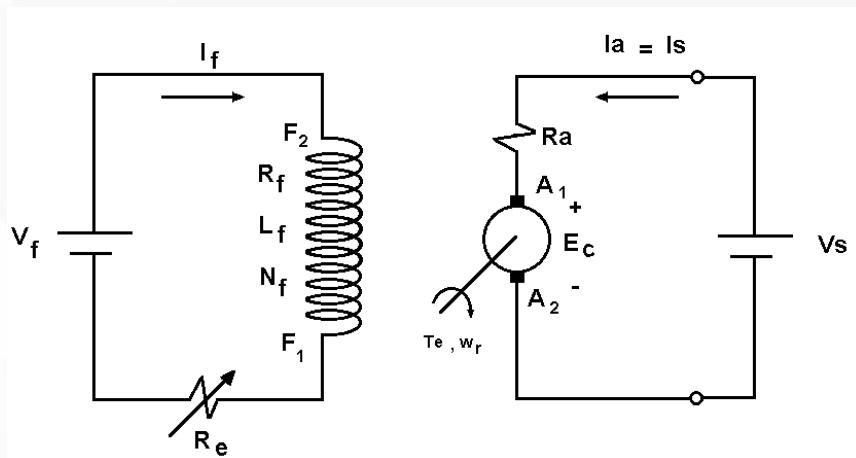


Obtención de Parámetros del Motor DC en forma Experimental

Cálculo de Br:

$$\omega_r(s) = \frac{T_e(s)}{(sJ + B)}$$

$$B_r = \frac{T_e}{\omega_r}$$



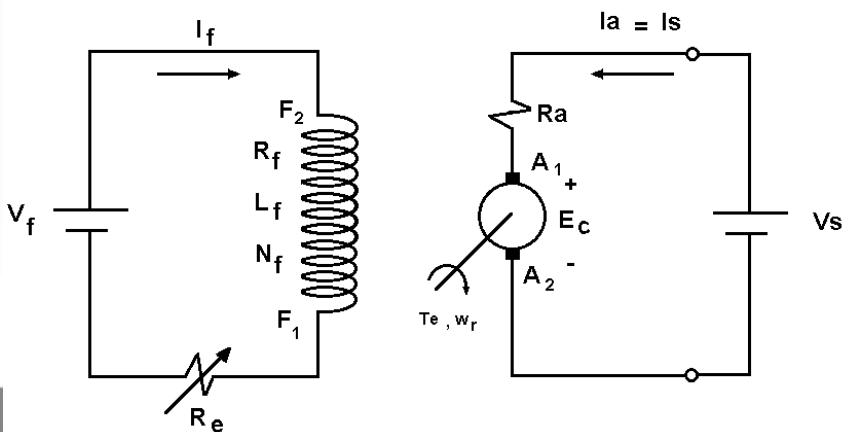
Variables de estado del Motor de CC

$$V_f = L_f \frac{\partial I_f}{\partial t} + (R_f + R_e) I_f$$

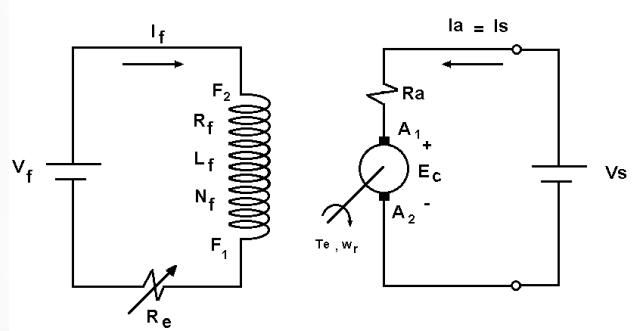
$$V_s = L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} + R_a I_a + E_c$$

$$E_c = \begin{cases} k\Phi\omega_r \\ k\Phi n_r \end{cases} \quad T_e = k\Phi I_a$$

$$T_e - T_L = J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r + K_r \theta_r$$



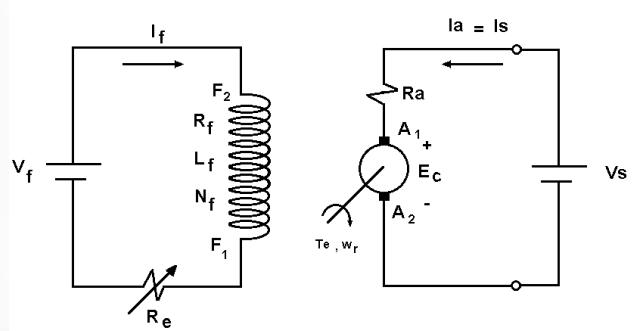
Variables de estado del Motor de CC



$$T_L = 0 \quad K_r = 0$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \dot{\omega}_r & \dot{x}_1 &= \frac{1}{J} \{T_e - B_r x_1\} \\
 & & x_1 &= \frac{1}{J} \{k\Phi x_2 - B_r x_1\} & T_e &= k\Phi I_a \\
 & & \dot{x}_1 &= -\frac{B}{J} x_1 + \frac{k\Phi}{J} x_2 \\
 \dot{x}_2 &= i_a & T_e - T_L &= J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + B_r \omega_r + K_r \theta_r
 \end{aligned}$$

Variables de estado del Motor de CC



$$T_L = 0 \quad K_r = 0$$

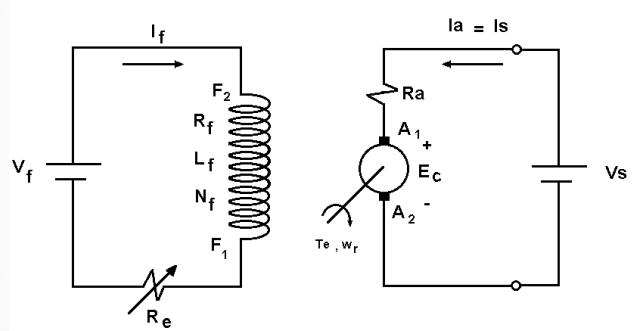
$$\dot{x}_2 = i_a \quad \dot{x}_2 = \frac{1}{L_a} \{V_s - E_c - R_a x_2\}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{L_a} \{V_s - k\Phi x_1 - R_a x_2\}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k\Phi}{L_a} x_1 - \frac{R_a}{L_a} x_2 + \frac{1}{L_a} V_s$$

$$\dot{x}_1 = \dot{\omega}_r$$

Variables de estado del Motor de CC



$$T_L = 0 \quad K_r = 0$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{k\Phi}{J} \\ -\frac{k\Phi}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_s$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

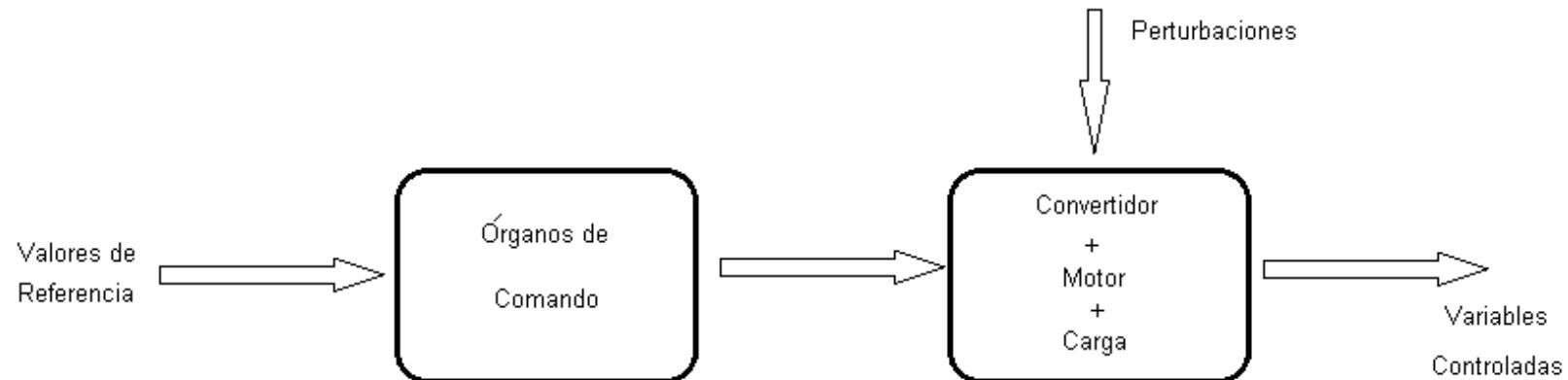
Técnicas de Control de la Máquinas Eléctricas

- Funciones de los dispositivos de Control:
- Establecer determinadas variables(velocidad, T_e , etc) de acuerdo a los valores de referencia, sean ellos fijos o variables
- Realizar la Interface Hombre - Máquina

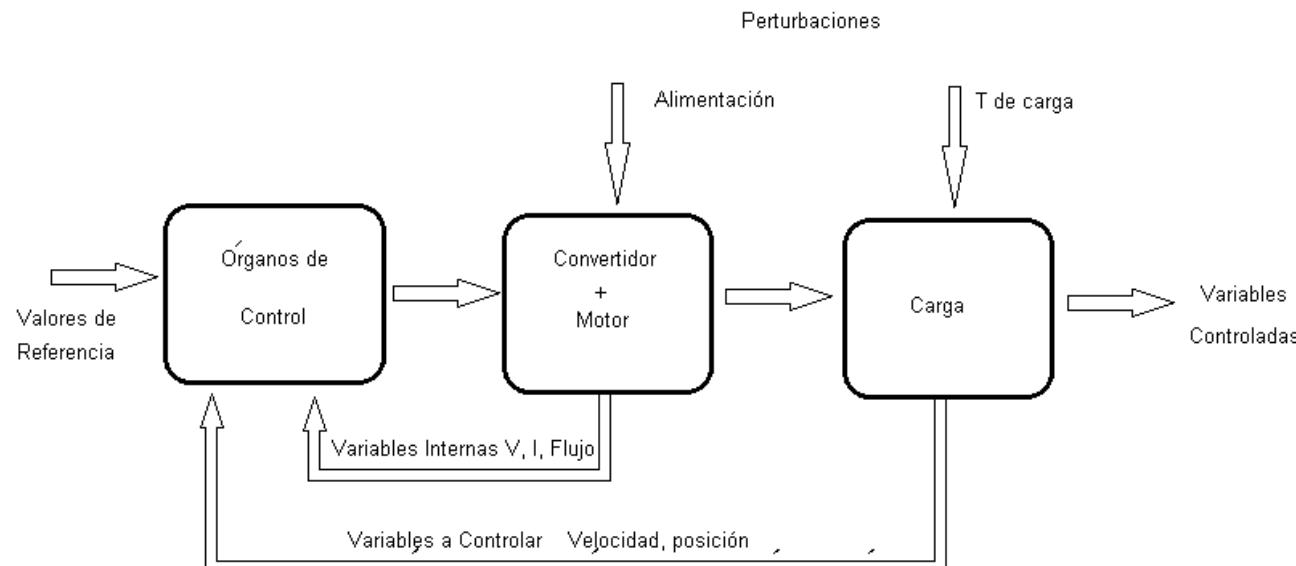
Técnicas de Control de la Máquinas Eléctricas

- Funciones de los dispositivos de Control:
- Protección de los equipos
- Proporcionar toda la potencialidad del conjunto con un buen rendimiento
- Adaptarse a nuevas estrategias de control ????

Estructura de un Sistema de Control (Lazo Abierto)



Estructura de un Sistema de Control (Lazo Cerrado)



Descripción de los Sistemas

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

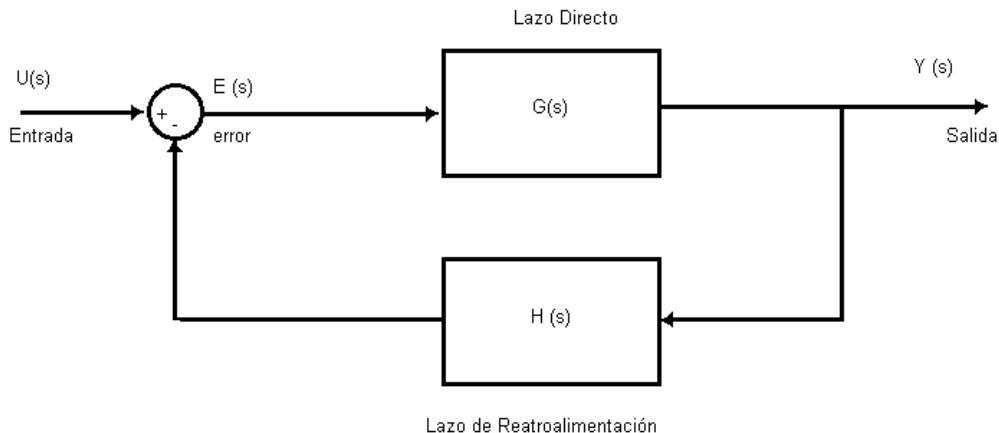
$$y = Cx + Du$$

A, B, C, D Matrices
Constantes
x=variables de estado
de entrada
Y= variables de salida
U= vector de entrada

Sistemas Continuos descritos por Funciones de Transferencia

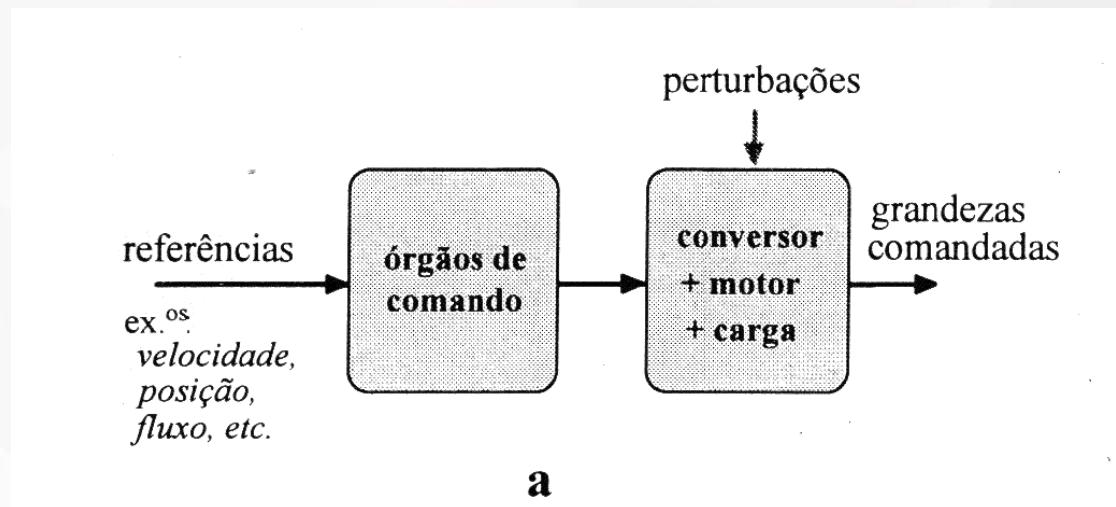
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

$$\frac{E(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$$

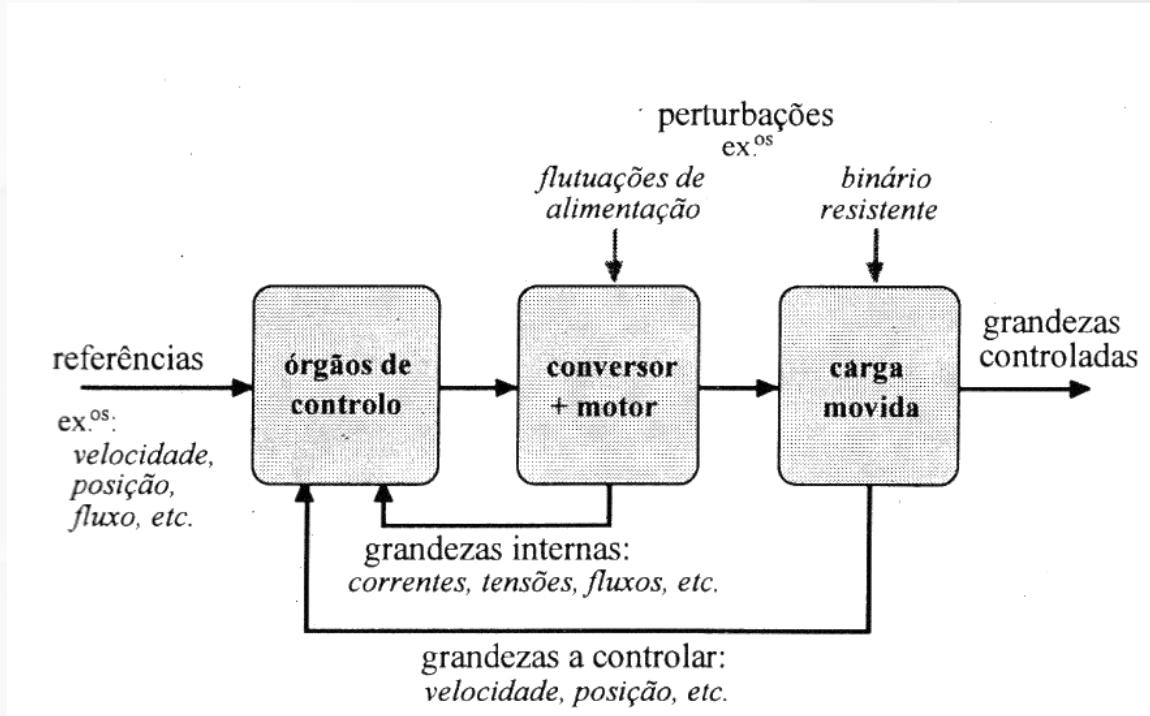


Control de Velocidad en Lazo Abierto

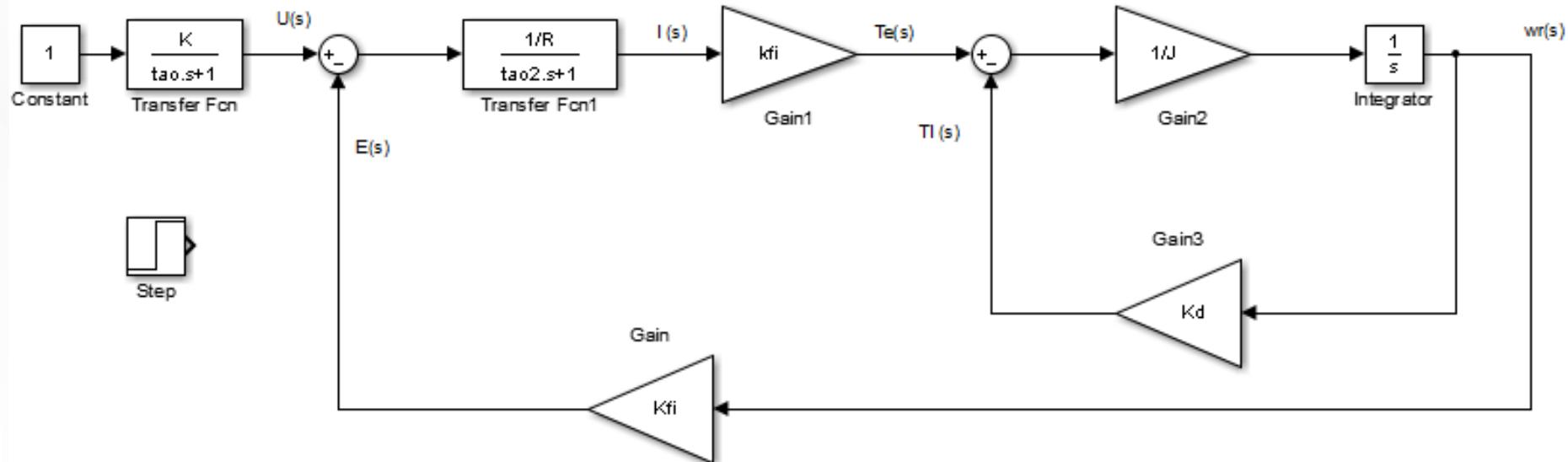
- La Regulación de Velocidad en Lazo abierto, tal como indica su nombre, no tomará en cuenta ningún ajuste de los parámetros a controlar.



Control de Velocidad en Lazo Cerrado



Control de Velocidad en Lazo Abierto



Rapidez de Respuesta en los Sistemas (Primer orden)

$$Y(s) = \frac{K}{1 + \tau s} U(s)$$

Con una entrada escalón :

$$y = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

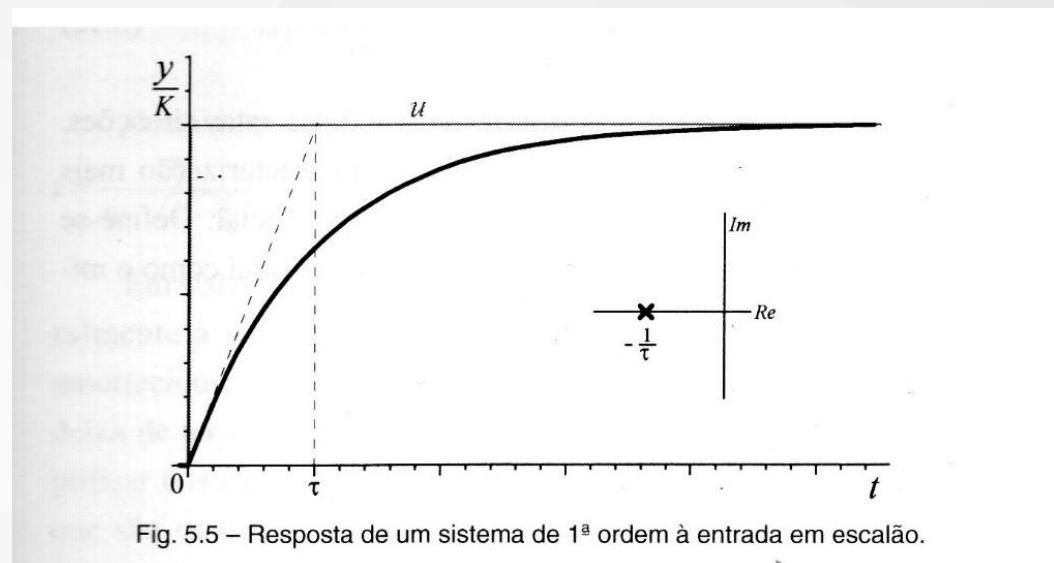


Fig. 5.5 – Resposta de um sistema de 1^a ordem à entrada em escalão.

Rapidez de Respuesta en los Sistemas (Segundo orden)

Sin la presencia de ceros en a FT :

$$Y(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} U(s)$$

ξ = Factor e Amortiguamiento

Con una entrada escalón y
un caso de $\xi < 1$ (polos complejos conjugados) :

$$y = \left[1 - \frac{e^{-\omega_0 t}}{\sqrt{(1-\xi^2)}} \sin\left(\sqrt{(1-\xi^2)}\omega_0 t + \alpha\right) \right] \frac{K}{\omega_0^2},$$

$$\alpha = \arccos(\xi)$$

Rapidez de Respuesta en los Sistemas (Segundo orden)

Sin la presencia de ceros en la FT :

$$Y(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} U(s)$$

ξ = Factor e Amortiguamiento

Con una entrada escalón y

un caso de $\xi < 1$ (polos reales) :

$$y = \left[1 + \frac{1}{2(\xi k_1 - 1)} e^{-k_1 \omega_0 t} + \frac{1}{2(\xi k_2 - 1)} e^{-k_2 \omega_0 t} \right] \frac{K}{\omega_0},$$

Con $k_1 = \xi - \sqrt{\xi^2 - 1}$ y $k_2 = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1}$ $\xi = 1$ (polos reales)

$$y = \left[1 - \omega_0 t e^{-\omega_0 t} - e^{-\omega_0 t} \right] \frac{K}{\omega_0}$$

Rapidez de Respuesta en los Sistemas

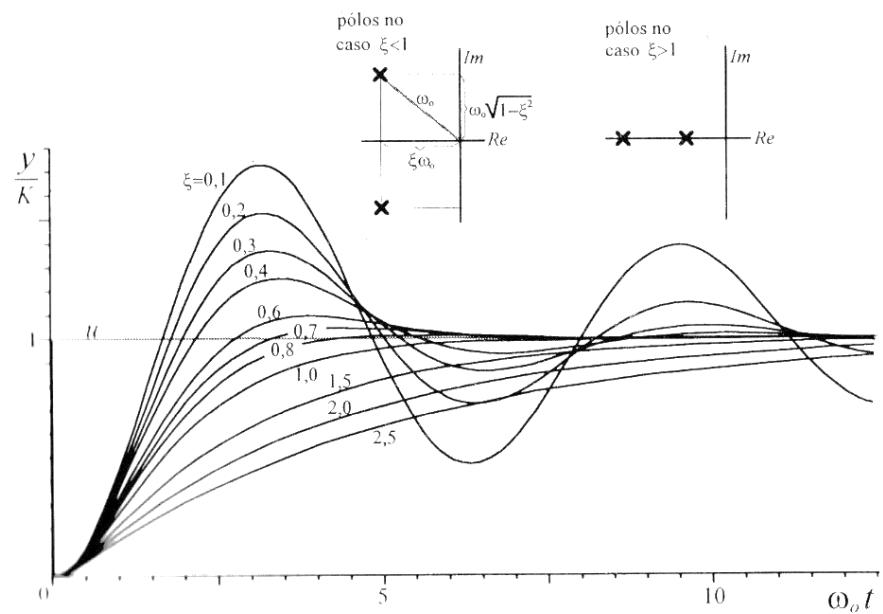
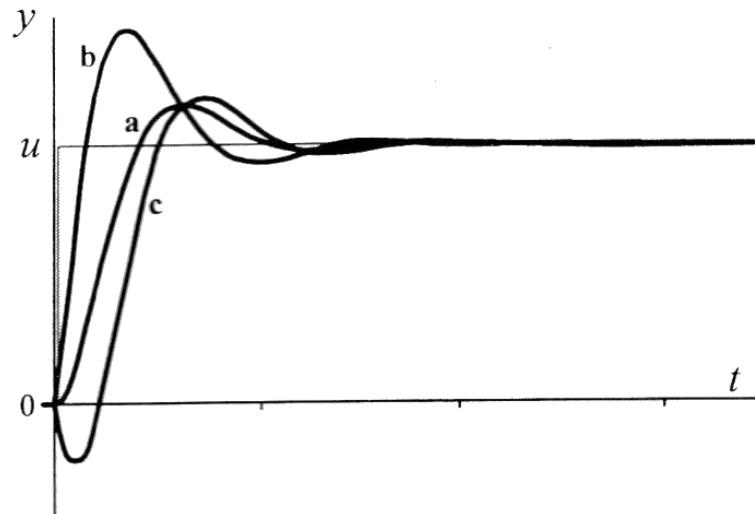
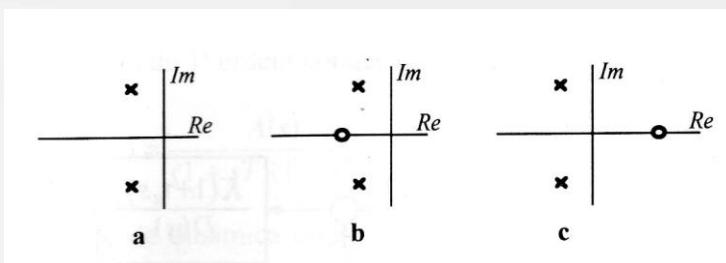


Fig. 5.6 - Resposta ao escaloado de um sistema de segunda ordem para diversos valores do factor de amortecimento ξ .

Respuesta de un Sistema de Segundo Orden



5.9 – Resposta de um sistema de 2^a ordem: **a** – sem zeros, **b** – com um zero negativo, **c** – com fase não mínima. A presença de zeros na FT pode alterar drasticamente o padrão de resposta relativamente ao que se conhece das situações apenas com pólos.



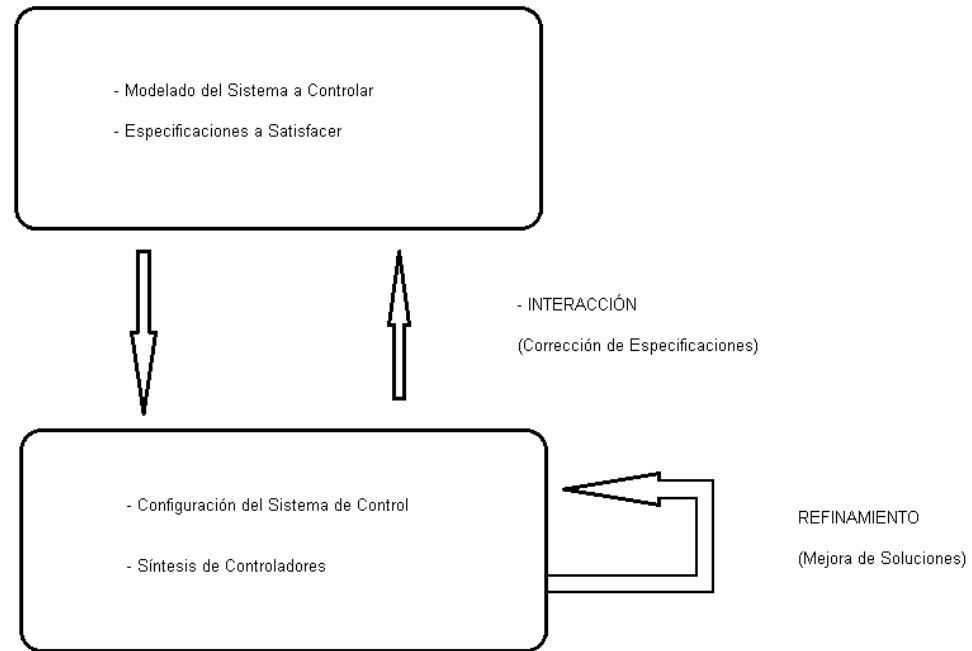
Proyecto de Sistemas Univariables por Vía Analítica

- El Proyecto de un Sistema de Control consiste en la síntesis de controladores que cumplan determinadas especificaciones:
 - Estabilidad
 - Error
 - rapidez
 - Otras

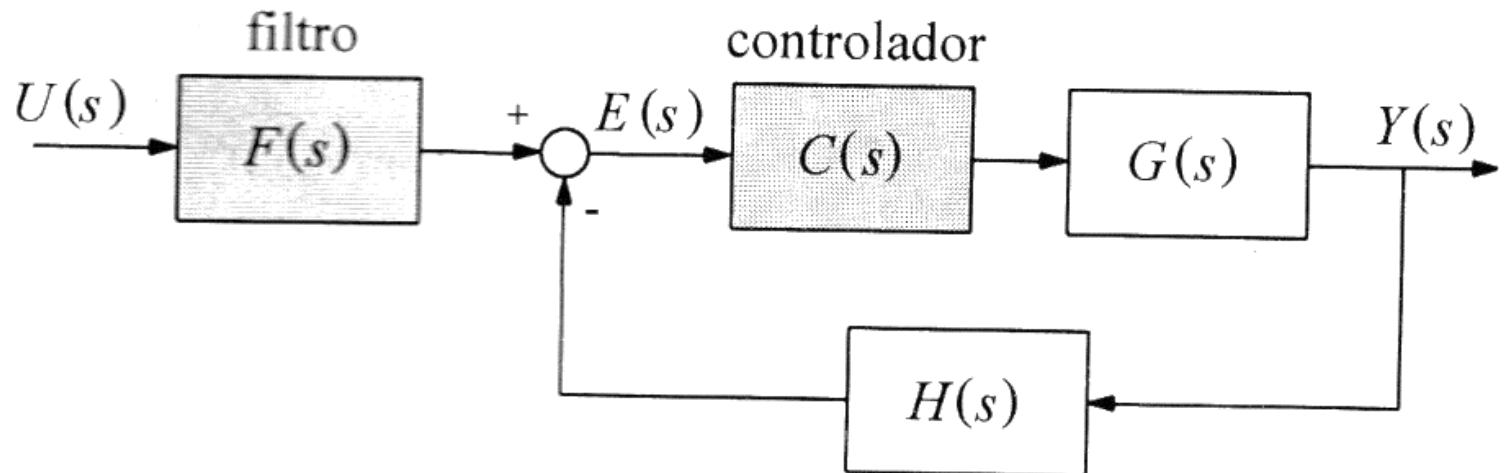
Proyecto de Sistemas Univariables por Vía Analítica

➤ Ayudas:

- Técnicas Teóricas
- Experiencias del Proyectista
- Programas apoyados por Computadora
- Verificaciones
- Correcciones experimentales



Compensación en Lazo Cerrado



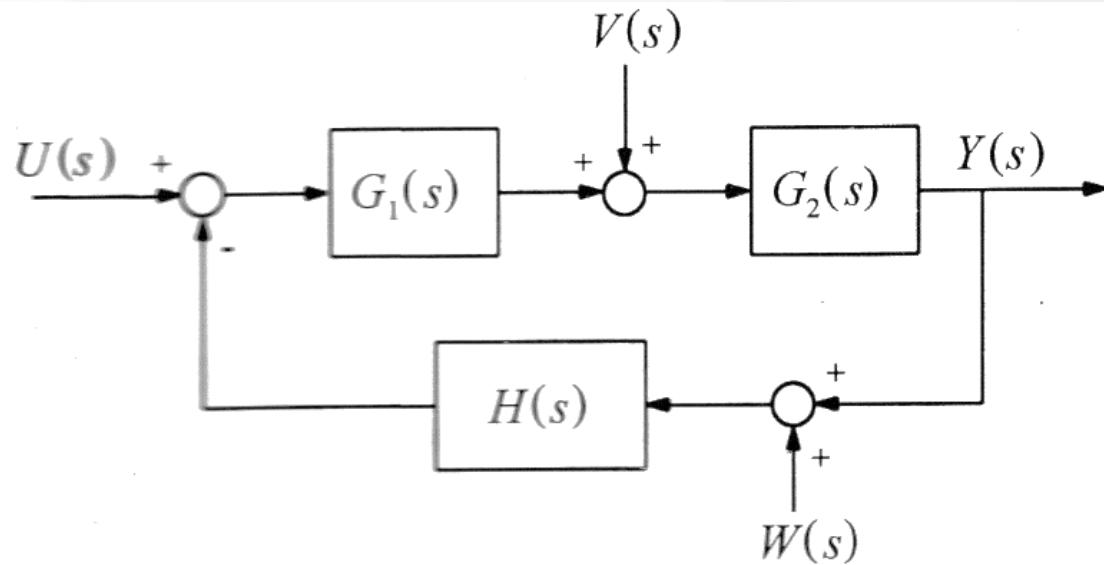
Tipos de Controladores más Utilizados

Designação do controlador	$C(s)$
<i>proporcional (P)</i>	K_c
<i>proporcional-derivativo (PD)</i>	$K_c(1 + \tau_c s)$ ou $K_p + K_D s$
<i>proporcional-integral (PI)</i>	$\frac{K_c(1 + \tau_c s)}{s}$ ou $K_p + \frac{K_I}{s}$
<i>proporcional-integral-derivativo (PID)</i>	$\frac{K_c(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}{s}$ ou $K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$
<i>avanço/atraso de fase</i>	$K_c \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s}$
<i>filtro passa-baixo</i>	$\frac{K_c}{1 + \tau s}$

Reacción a la Perturbación de Carga y de Ruido de Observación

- En un sistema puede existir:
 - Perturbación en el lazo directo $v(t)$
 - Perturbación en el sensor $w(t)$
- $v(t)$ esta asociado a fenómenos de carga (misma frecuencia de las entrada)
- $w(t)$ esta asociada al error en la medición (alta frecuencia)

Reacción a la Perturbación de Carga y de Ruido de Observación



Reacción a la Perturbación de Carga y de Ruido de Observación

$$\frac{Y_v(s)}{V(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{Sensibilidad})$$

$$\frac{Y_w(s)}{W(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

Reacción a la Perturbación de Carga y de Ruido de Observación

$$\frac{Y_u(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

Relación Señal - ruido :

$$\frac{Y_u(s)}{Y_v(s)} = G_1(s) \frac{U(s)}{V(s)} \quad \frac{Y_u(s)}{Y_w(s)} = \frac{1}{H(s)} \frac{U(s)}{V(s)}$$

Realimentación con Ganancia Unitaria

- Hasta ahora los proyectos vistos se consideran:
 - con realimentación Unitaria
 - Ganancia Unitaria
- Esto implica que las variables usadas en el módulo de referencia y sumador están en la misma escala que la variable controlada (no es siempre verificable)
- Por lo tanto se hace necesario un sensor para medir la variable controlada

Realimentación con Ganancia Unitaria

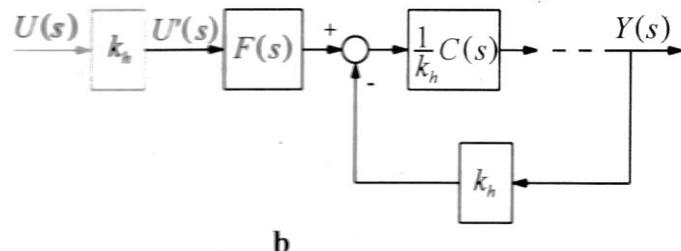
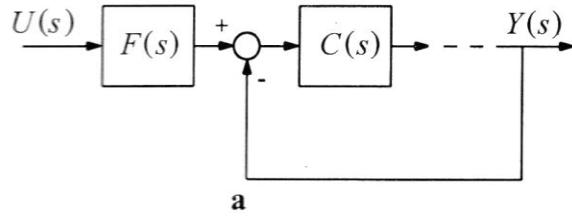


Fig. 5.19 – Alteração nos ganhos dum anel de controlo com realimentação unitária
(a) para outro equivalente com ganho k_h na realimentação (b).

Problemas Típicos de Control Univariable en Accionamientos

- Regulación de una Corriente de Excitación
- Control de una Corriente en un Circuito con Fuerza Electromotriz Perturbadora
- Control de Velocidad
- Control de Posición

Regulación de una Corriente de Excitación

- El Comportamiento Dinámico del Conjunto:

$$U(s) = K e^{-s\tau_e} U_c(s) \quad U(s) = (R + sL)I(S)$$

- ζ_e : atraso estático del convertidor (despreciable)

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K}{R}}{(1 + \tau_e s)(1 + \tau_i s)} \therefore \tau_i = \frac{L}{R}$$

Regulación de una Corriente de Excitación

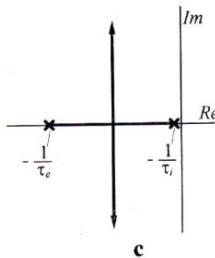
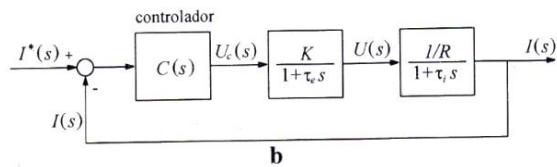
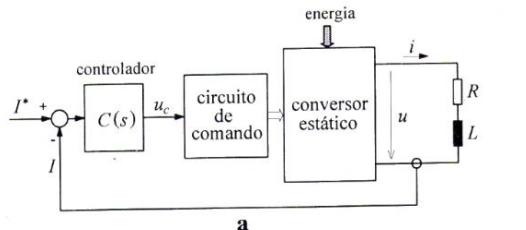
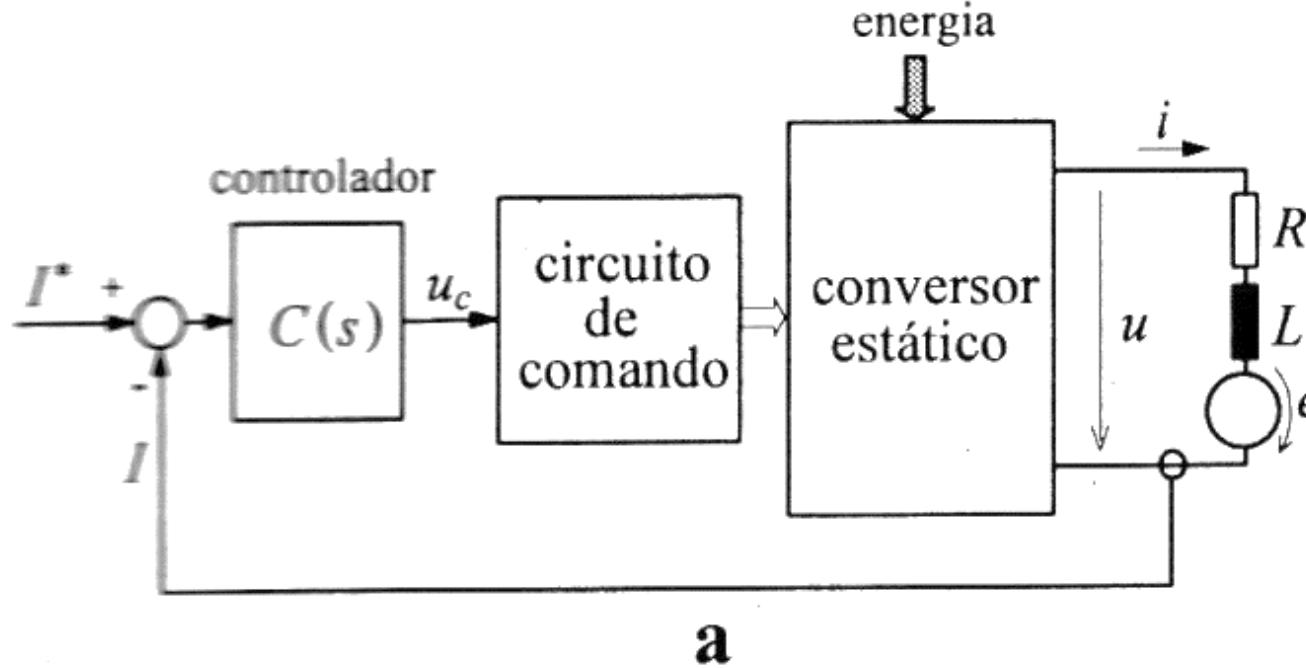


Fig. 5.20 – Regulação de corrente num circuito RL série: a – esquema do circuito e anel de controlo, b – diagrama de blocos do anel de controlo, c – lugar das raízes com compensador proporcional.

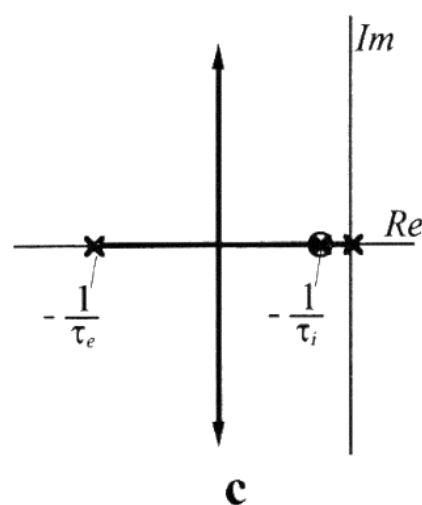
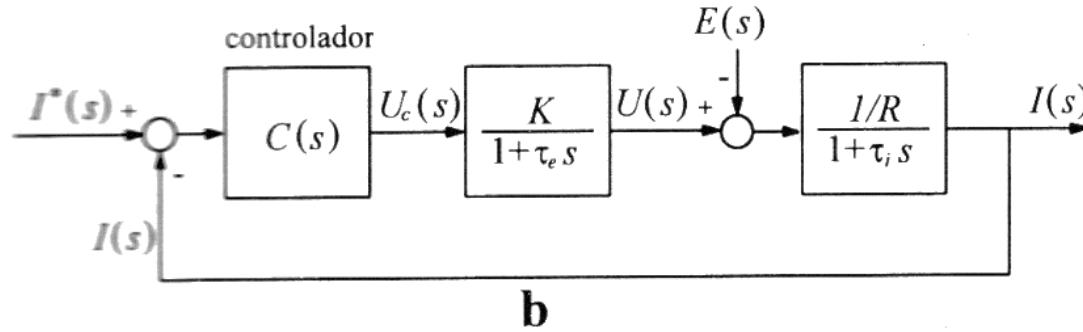
Control de la Corriente en un Circuito con Fuerza Electromotriz Perturbadora

- Que hacer cuando se requiere controlar la Corriente en circuitos sujetos a perturbaciones
- El Inducido de un motor de Corriente Contínua con excitación separada es un caso típico
 - fem
 - Variación de la tensión del convertidor
- La constante $\zeta i = L/R$ es normalmente baja

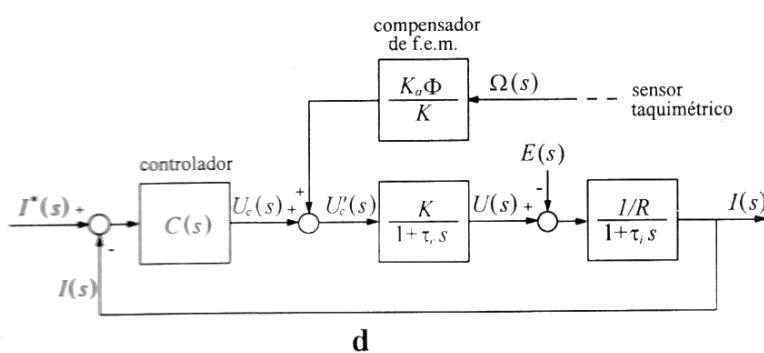
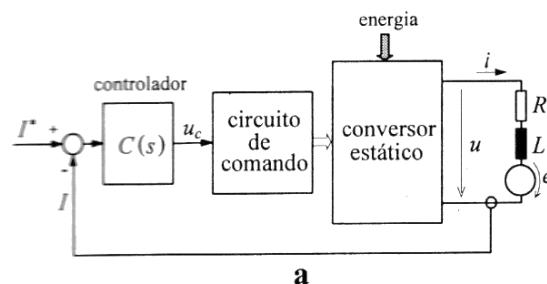
Control de la Corriente en un Circuito con Fuerza Electromotriz Perturbadora



Control de la Corriente en un Circuito con Fuerza Electromotriz Perturbadora



Control de la Corriente en un Circuito con Fuerza Electromotriz Perturbadora

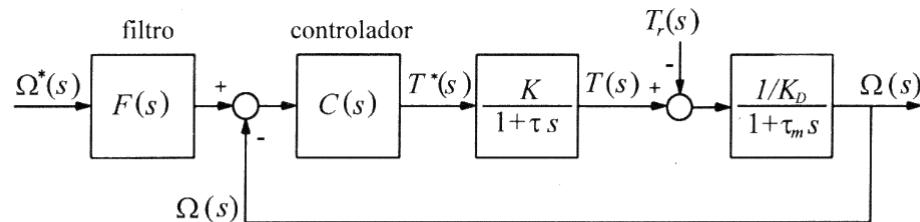


Solución alternativa
realizando
recompensación del
efecto de la femm

Control de Velocidad

- Considerando la parte electromagnética del actuador:
 - Circuito de Comando
 - Convertidor
 - Máquina eléctrica
- descrita de la siguiente forma:
 - Bloque con kte de tiempo eléctrica ζ y ganancia K
 - Bloque mecánico con J, K_D
 - T_r

Control de Velocidad



a

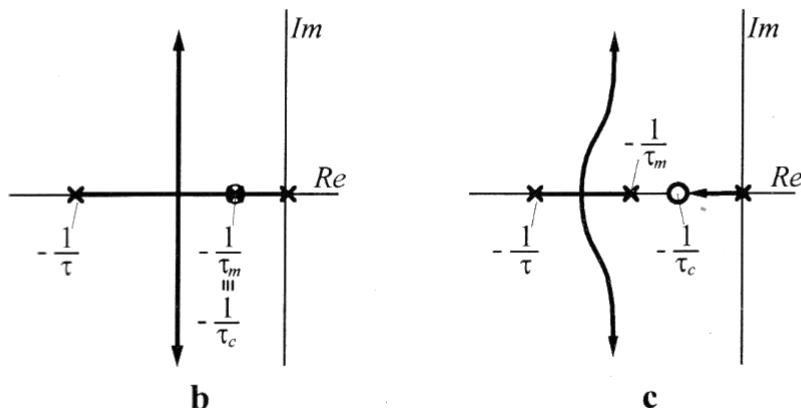


Fig. 5.22 – **a:** controlo de velocidade num actuador representável por um modelo de 1^a ordem com constante de tempo “eléctrica” τ e constante de tempo “mecânica” τ_m ; **b e c:** lugares geométricos das raízes no caso de controlador PI em duas situações distintas quanto à colocação do zero do controlador.

Control de Velocidad

- El Compensador PI se torna interesante para eliminar el error y atenuar la perturbación de la carga

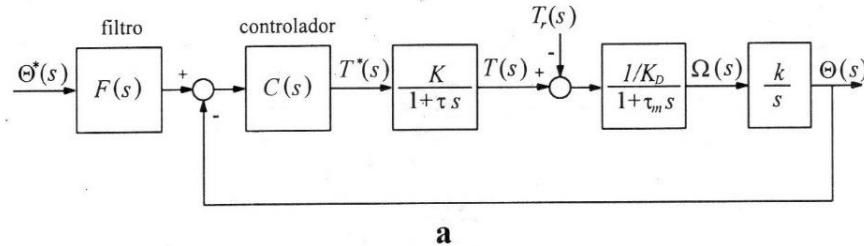
- Una solución consiste en cancelar el polo mecánico con cero del compensador

$$C(s) = \frac{K_c(1 + \tau_c s)}{s} \therefore \tau_c = \tau_m \quad F(s) = 1 \quad \frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{\frac{K_c K}{K_D \tau}}{s^2 + \frac{s}{\tau} + \frac{K_c K}{K_D \tau}}$$

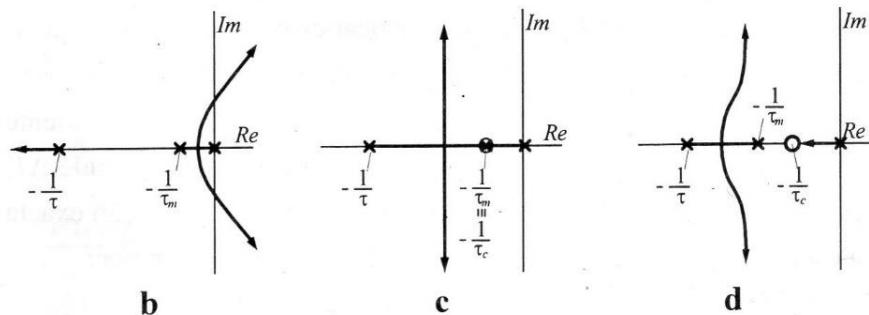
Control de Posición

- Un modelo de control de posición deberá incluir el modelo de velocidad + una integración
- k será un factor de escala
- existen entonces 3 polos en el sistema a controlar (uno en el origen)
- Obliga un Efecto de avance en la compensación(por lo menos un cero) para lograr rapidez y estabilidad

Control de Posición



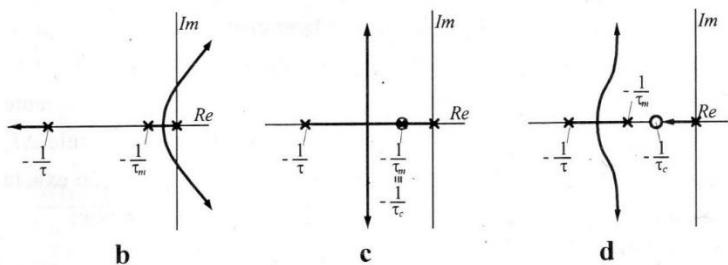
a



– **a:** modelo de um sistema de controlo de posição; **b:** lugar das raízes no caso de controlador proporcional; **c, d:** idem no caso de controlador PD (equivalente a realimentação de posição e velocidade).

Control de Posición

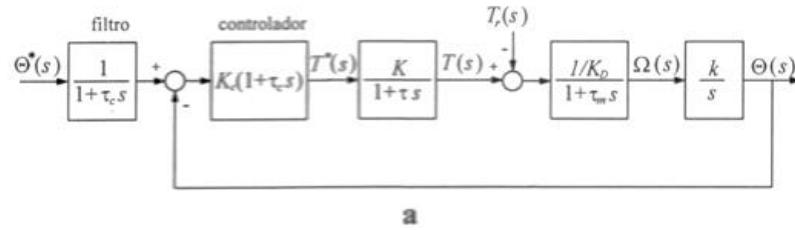
- Una Solución simple es colocar un cero entre el polo y el origen (b,c) PD:



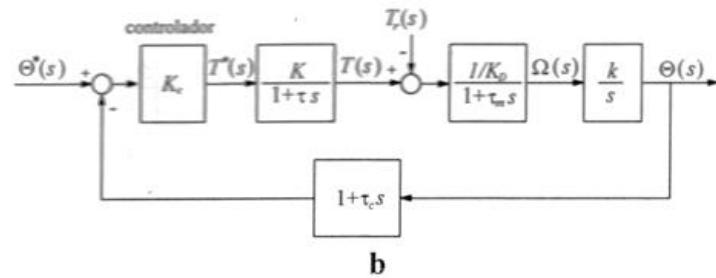
– **a**: modelo de um sistema de controlo de posição; **b**: lugar das raízes no caso de controlador proporcional; **c, d**: idem no caso de controlador PD (equivalente a realimentação de posição e velocidade).

$$K_c = \frac{K_D}{2Kk\tau_c} \therefore \tau_c = \tau_m \quad F(s) = 1$$

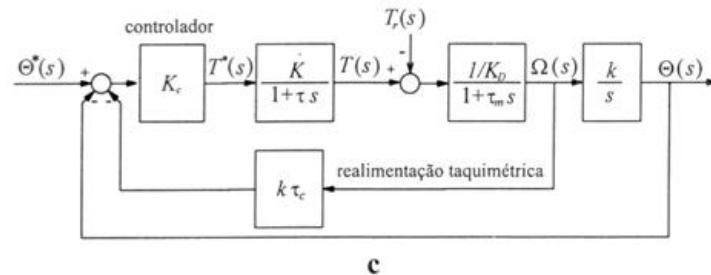
Control de Posición



a



b



c

Fig. 5.25 – Esquemas equivalentes de controlo de posição para casos em que $\tau_m > 2\tau_c$:
a – solução conceptual de compensação PD de acordo com (5.28);
b – alternativa com derivação da grandeza posição;
c – versão recomendada para implementação.

Consideraciones

- Viabilidad de los modelos adoptados para los diferentes elementos físicos (sobre todo en las simplificaciones)
- Conocimiento de los parámetros y previsión de sus variaciones
- Limitaciones físicas de los elementos (P, I, V, wr, etc)

Control de Máquinas de Corriente Contínua

- Fueron las primeras máquinas con control de velocidad por su simplicidad
- Circuitos basados en reóstatos
- Costos por las pérdidas Joule
- Regulación de Velocidad Ward Leonard
- Hoy en día convertidores de potencia realizan dicha labor

Control de Máquinas de Corriente Contínua

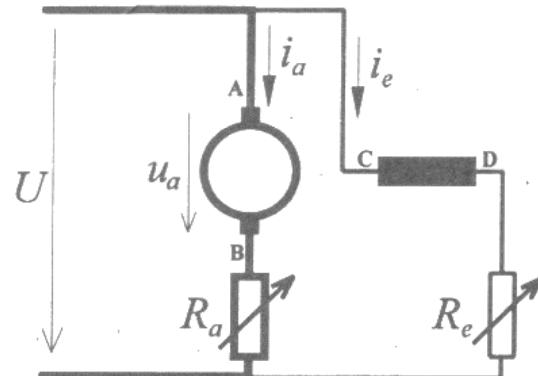


Fig. 6.1 – Comando de uma máquina de corrente contínua com reóstatos.

Sistema Ward Leonard

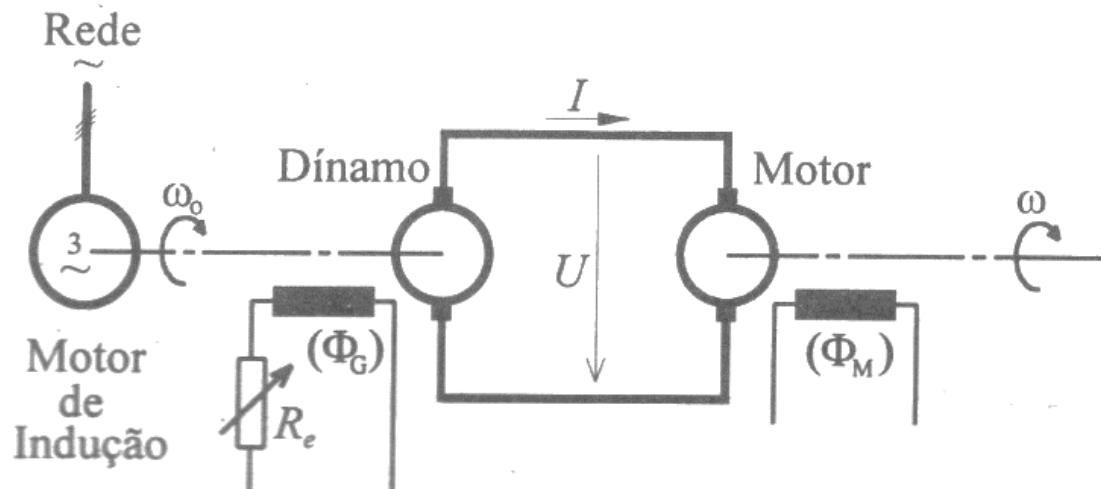
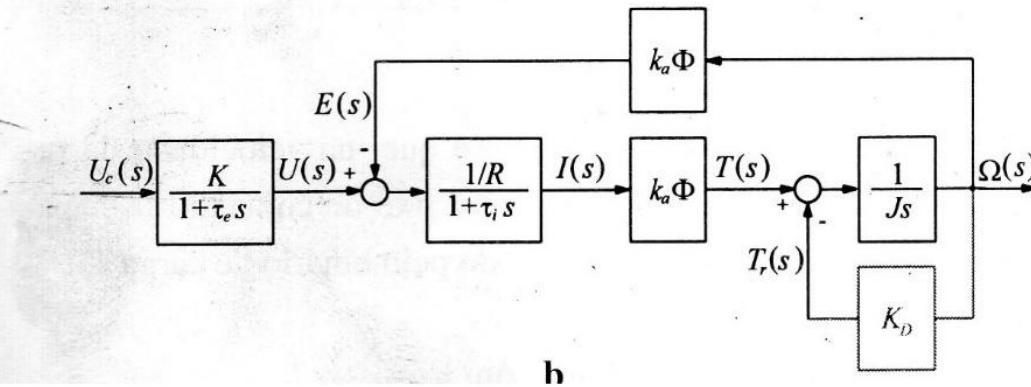
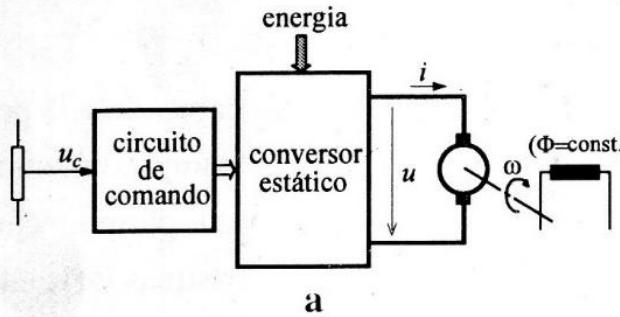


Fig. 6.2 – Sistema Ward Leonard: $\omega_o = \text{const.}$ e $\Phi_M = \text{const.} \Rightarrow \omega \approx k_1 U \approx k \Phi_G$.

Control de Velocidad en Lazo Abierto

- Esquema básico:



Control de Velocidad en Lazo Abierto

$$\Omega(s) = \frac{K}{(1 + \tau_e s)} \frac{\frac{K_a \Phi}{\tau_i J R}}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(K_a \Phi)^2}{\tau_i J R}} U_c(s) - \frac{\frac{1}{\tau_i J} (1 + \tau_i s)}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(K_a \Phi)^2}{\tau_i J R}} T_r(s)$$

Control de Velocidad en Lazo Abierto

- Para el caso de carga lineal $T_r = K_D \omega$

$$\Omega(s) = \frac{K}{(1 + \tau_e s)} \frac{\frac{K_a \Phi}{RK_D \tau_i \tau_m}}{s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \frac{1}{\tau_i \tau_m} \frac{(K_a \Phi)^2}{RK_D \tau_i \tau_m}} U_c(s) \quad \therefore \tau_m = \frac{J}{K_D}$$

Control de Velocidad en Lazo Abierto

$$\Omega(s) = \frac{K}{(1 + \tau_e s)} \frac{\frac{K_a \Phi}{\tau_i J R}}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(K_a \Phi)^2}{\tau_i J R}} U_c(s) - \frac{\frac{1}{\tau_i J} (1 + \tau_i s)}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(K_a \Phi)^2}{\tau_i J R}} T_r(s)$$

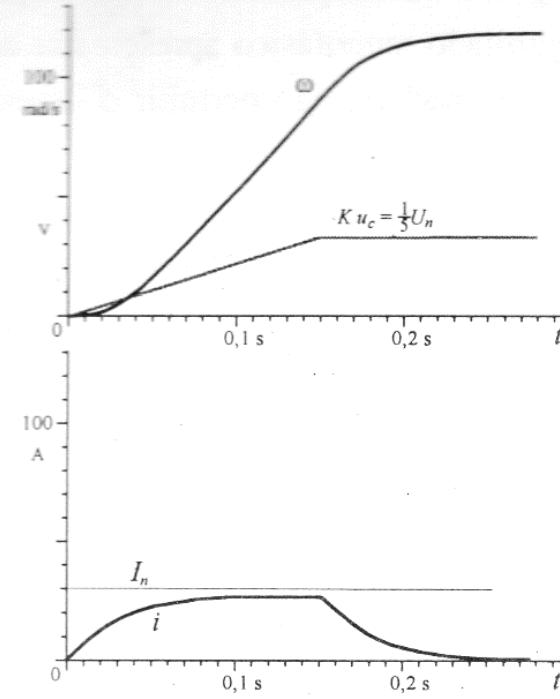
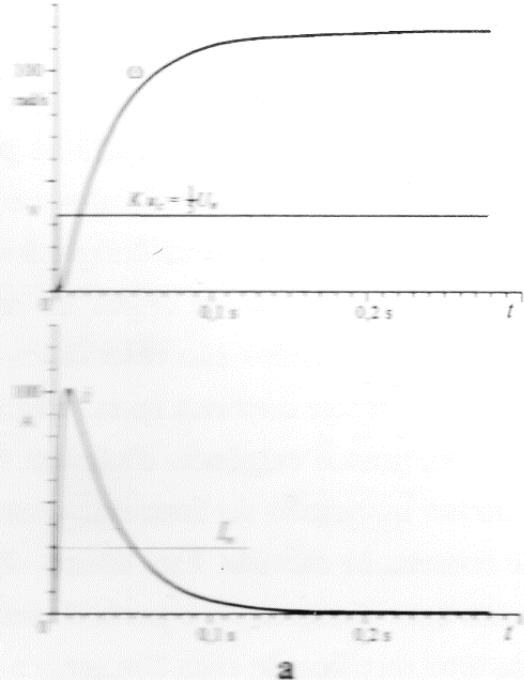
- La velocidad de régimen permanente impuesta por un valor fijo U_c , aparece sobrepujado de un desvío $\Delta\omega$ gracias al Torque de carga T_r

$$\omega = \frac{K}{K_a \Phi} U_c - \Delta\omega \quad \therefore \Delta\omega = \frac{R}{(K_a \Phi)^2} T_r$$

Control de Velocidad en Lazo Abierto

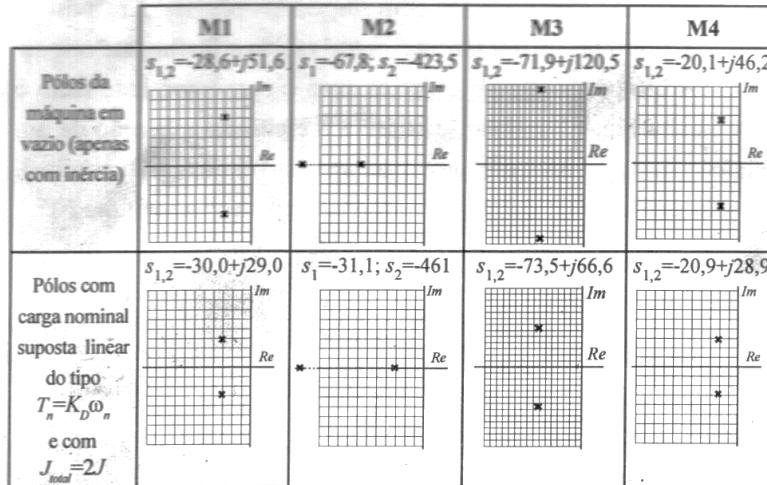
- Precauciones:
 - El error debido a T_r es independiente de la velocidad y puede volverse preocupante en baja velocidad
 - La variación de K (Ganancia de Convertidor) provoca un error relativo de igual proporción en la velocidad establecida
 - K en los rectificadores y circuitos de disparo o es lineal
 - K entonces puede provocar variaciones

Regulación de Velocidad en Lazo Abierto



Revisar

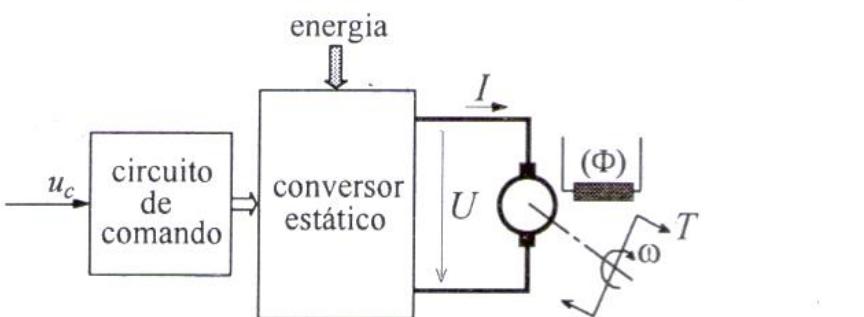
Ref. ^a	N_n rpm	T_n Nm	U_n V	I_n A	$K_a \Phi$ rps (traj.)	J kg m ²	τ_i (L/R) ms	R ohm	L mH	tipo de excitação
M1	3000	2,2	170	4,7	0,475	0,0012	17,5	3,09	54,1	magnet. perm.
M2	6000	6,0	176	21,3	0,286	0,005	2,06	0,28	0,57	eléctrica
M3	3400	32	400	29,4	1,09	0,014	6,94	0,62	4,31	eléctrica
M4	1670	685	400	322	2,18	1,3	24,8	0,058	1,44	eléctrica



Control de Velocidad en Lazo Cerrado

- Para este tipo de Control se utilizan dos tipos de convertidores:
 - Rectificadores Convencionales
 - Convertidores DC – DC (Choppers)
- Existen, de acuerdo al cuadrante de operación del accionamiento, diferentes topologías

Control de Velocidad en Lazo Cerrado



Quadrantes de serviço na carga		Exemplos de conversores aplicáveis
$T > 0$	$\omega > 0$	
$T > 0$	$\omega < 0$	
$T < 0$	$\omega > 0$	
$T < 0$	$\omega < 0$	

Fig. 6.5 – Conversores estáticos adaptados a cada regime de serviço pretendido na carga.

Control de Velocidad en Lazo Cerrado

- Accionamientos Unidireccionales: Con parada natural
- Accionamientos Unidireccionales: Con frenado electromagnético , frenado regenerativo
- Accionamientos Bidireccionales: Con carga activa (elevación de carga)
- Accionamientos Bidireccionales: Con Inversión Rápida (servomecanismos)

Control de Velocidad en Lazo Cerrado

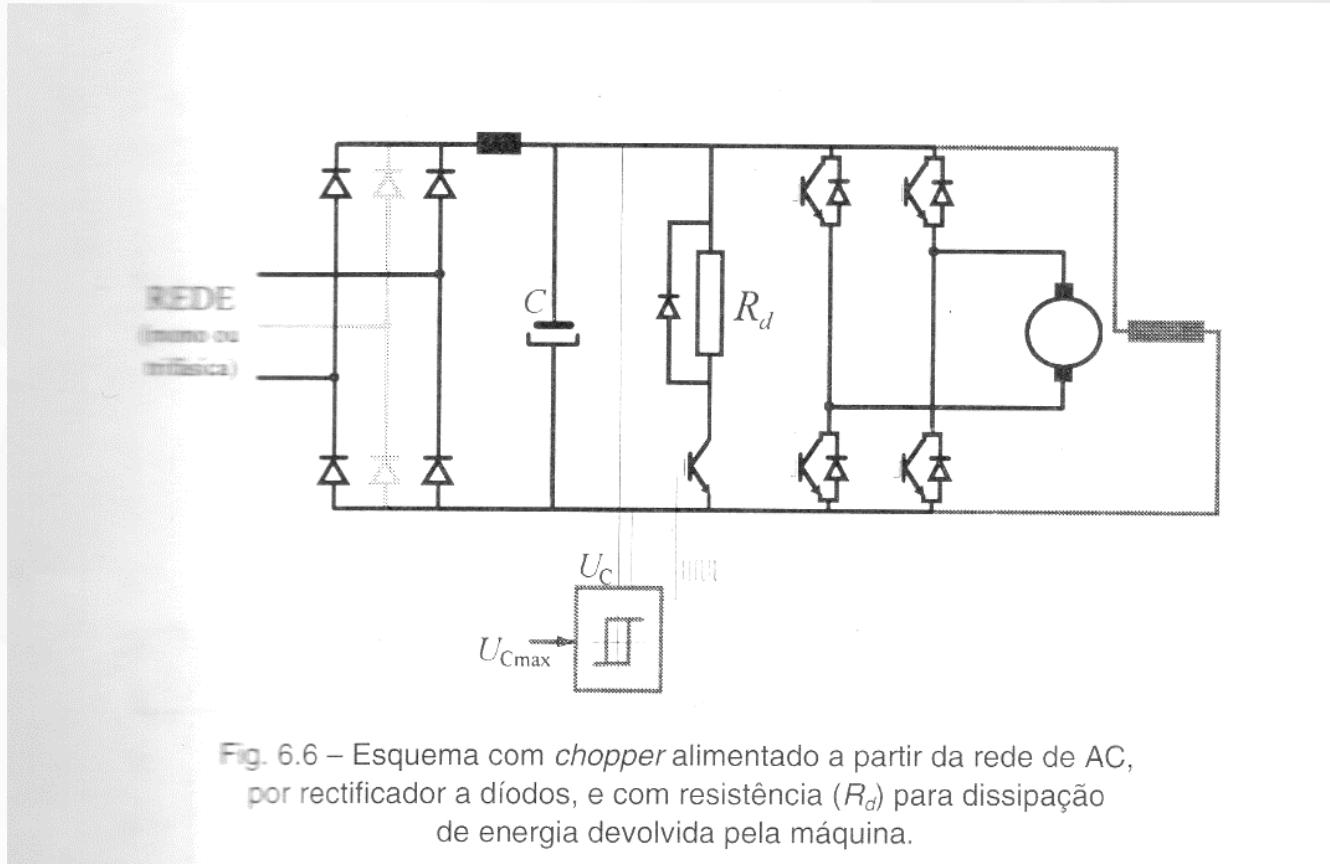


Fig. 6.6 – Esquema com *chopper* alimentado a partir da rede de AC,
por rectificador a díodos, e com resistência (R_d) para dissipação
de energia devolvida pela máquina.

Control de Velocidad en Lazo Cerrado

- Tipos de Control:
 - Control Directo de Velocidad
 - Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

Control Directo de Velocidad

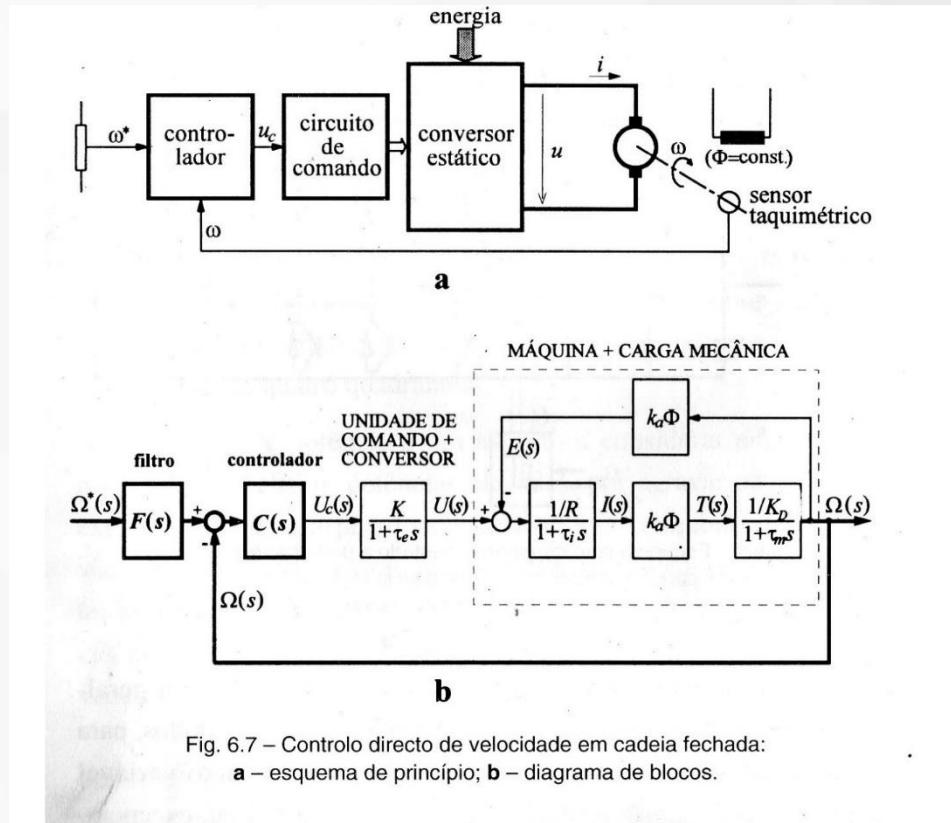


Fig. 6.7 – Controlo directo de velocidade em cadeia fechada:
a – esquema de princípio; b – diagrama de blocos.

Control Directo de Velocidad

$$\Omega(s) = \frac{K}{(1 + \tau_e s)} \frac{\frac{K_a \Phi}{RK_D \tau_i \tau_m}}{s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \frac{1}{\tau_i \tau_m} \frac{(K_a \Phi)^2}{RK_D \tau_i \tau_m}} U_c(s) \quad \therefore \tau_m = \frac{J}{K_D}$$

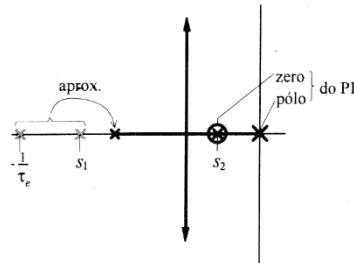
- Un polo atrasado del convertidor
- Dos polos asociados al motor

- reales para M2 y complejos conjugados para M1 M3 y M4
(Tabla)

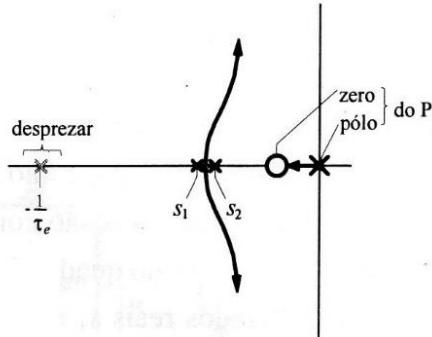
- Se debe configurar el PI=

$$PI = C(s) = \frac{K_c (1 + \tau_c s)}{s} \quad \therefore \quad \tau_c = \tau_m$$

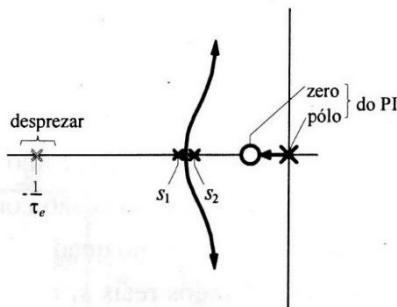
Control Directo de Velocidad



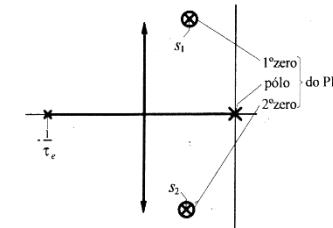
a



b



b



d

Fig. 6.8 – Exemplos de estratégias de compensação do sistema de controlo de velocidade da fig. 6.7 para várias disposições dos pólos da máquina (s_1 e s_2):

a, b, c – com um controlador PI, $C(s) = K_p(1 + \tau_i s)/s_1$;
d – com um controlador PID, $C(s) = K_p(1 + K_i/s + K_d s)$.

Control Directo de Velocidad

➤ Para el caso d:

$$\Omega(s) = \frac{K}{(1 + \tau_e s)} \frac{\frac{K_a \Phi}{RK_D \tau_i \tau_m A}}{s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \frac{1}{\tau_i \tau_m A} \frac{(K_a \Phi)^2}{RK_D \tau_i \tau_m}} U_c(s) \quad \therefore A = \frac{1}{\tau_i \tau_m} + \frac{(K_a \Phi)^2}{RK_D \tau_i \tau_m}$$

Control Directo de Velocidad

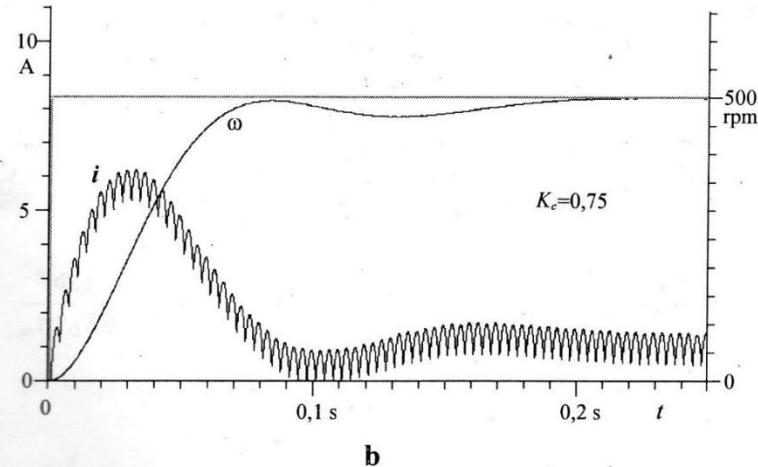
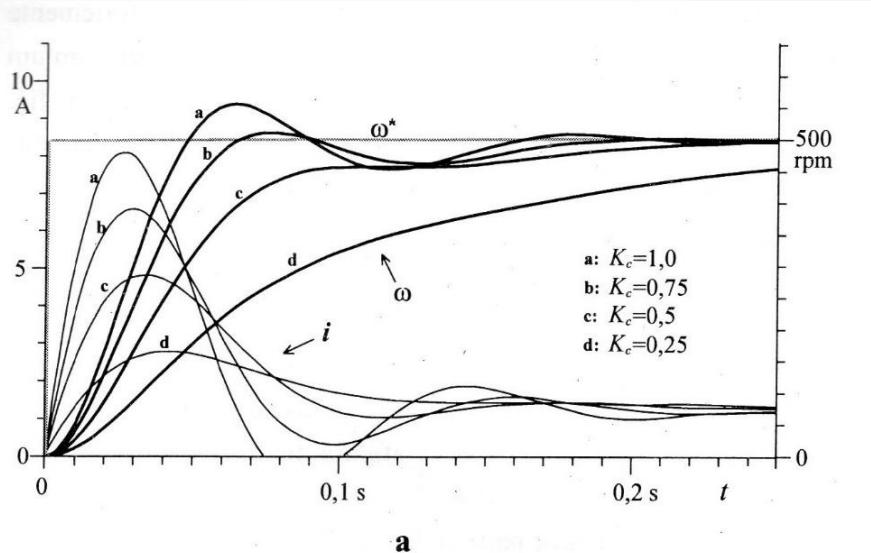
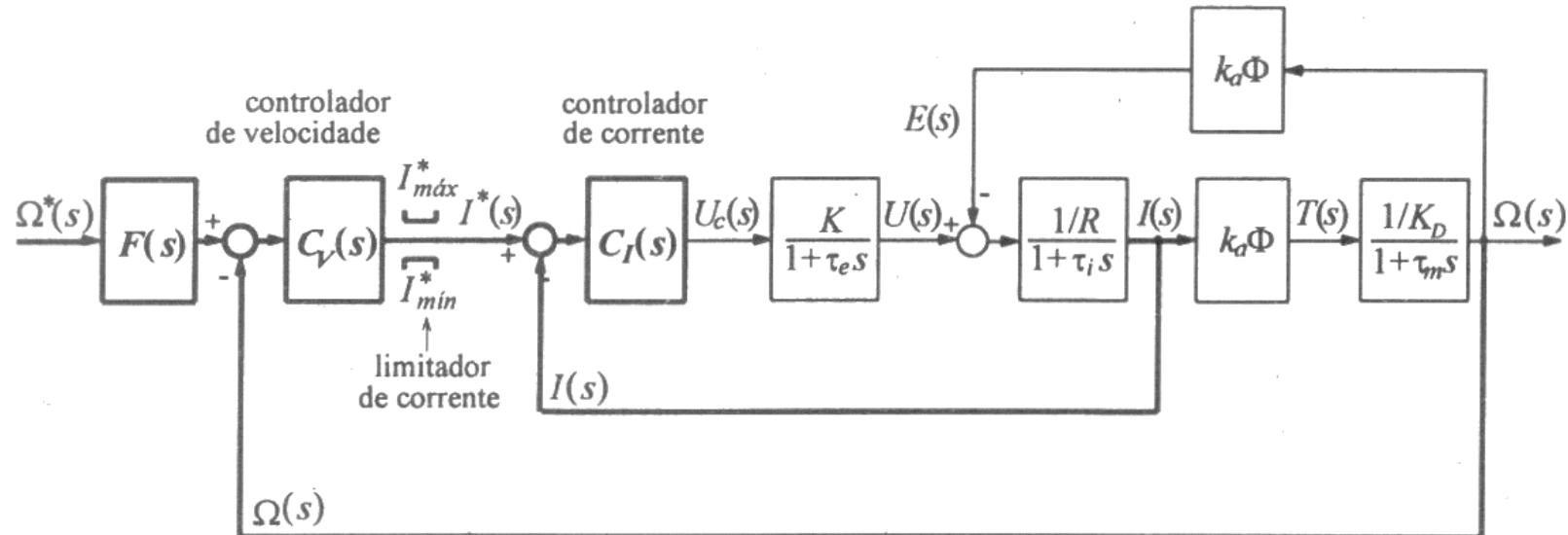


Fig. 6.9 – **a** – respostas do sistema da fig. 6.7 a um escalão $\omega^* = 500$ rpm, considerando o caso do motor M1 com $J_{total} = 0,0024 \text{ kgm}^2$, $K_D = 0,01 \text{ Nms}$, $K = 20$ e $\tau_e = 1,67 \text{ ms}$; o compensador é de tipo PI com $\tau_c = 30 \text{ ms}$ e diversos valores de K_c ; supõe-se que a tensão à saída do rectificador é lisa. **b** – resposta para o caso de $K_c = 0,75$ usando uma simulação mais detalhada do rectificador.

Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

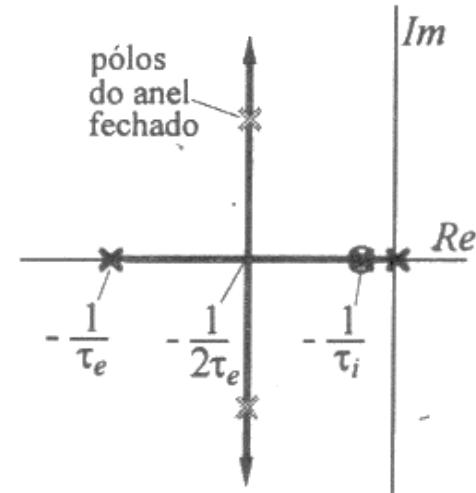
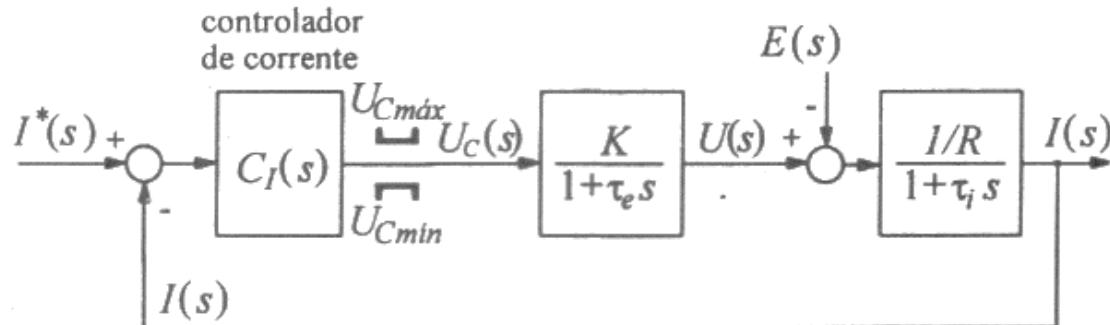
- I_a es proporcional al T_e
- La I_a de un motor de cc es elevada 20- 30 A
- Se hace necesario Limitar la Corriente
- Esto afectará el T_e

Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente



a

Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente



b

Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

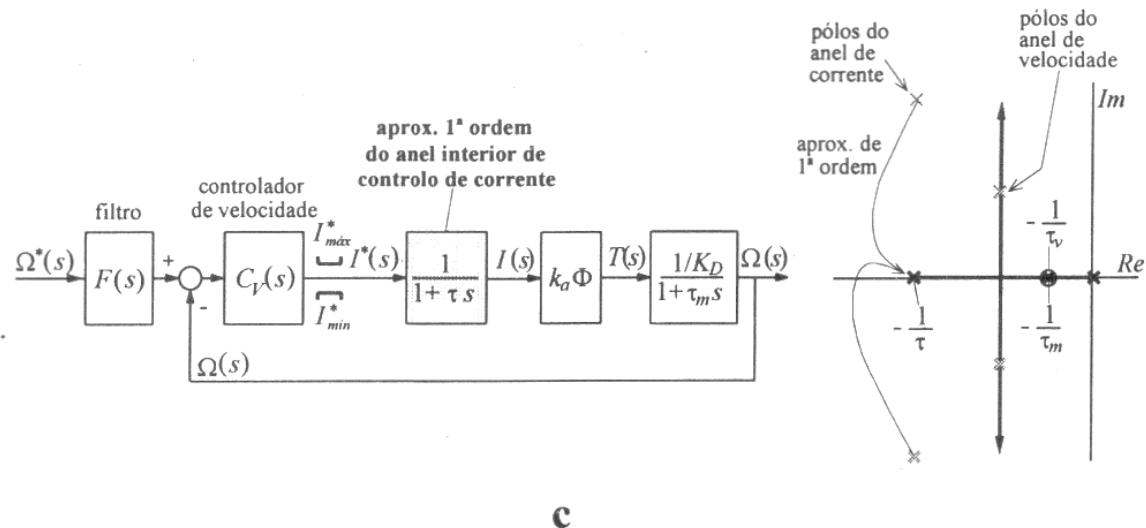
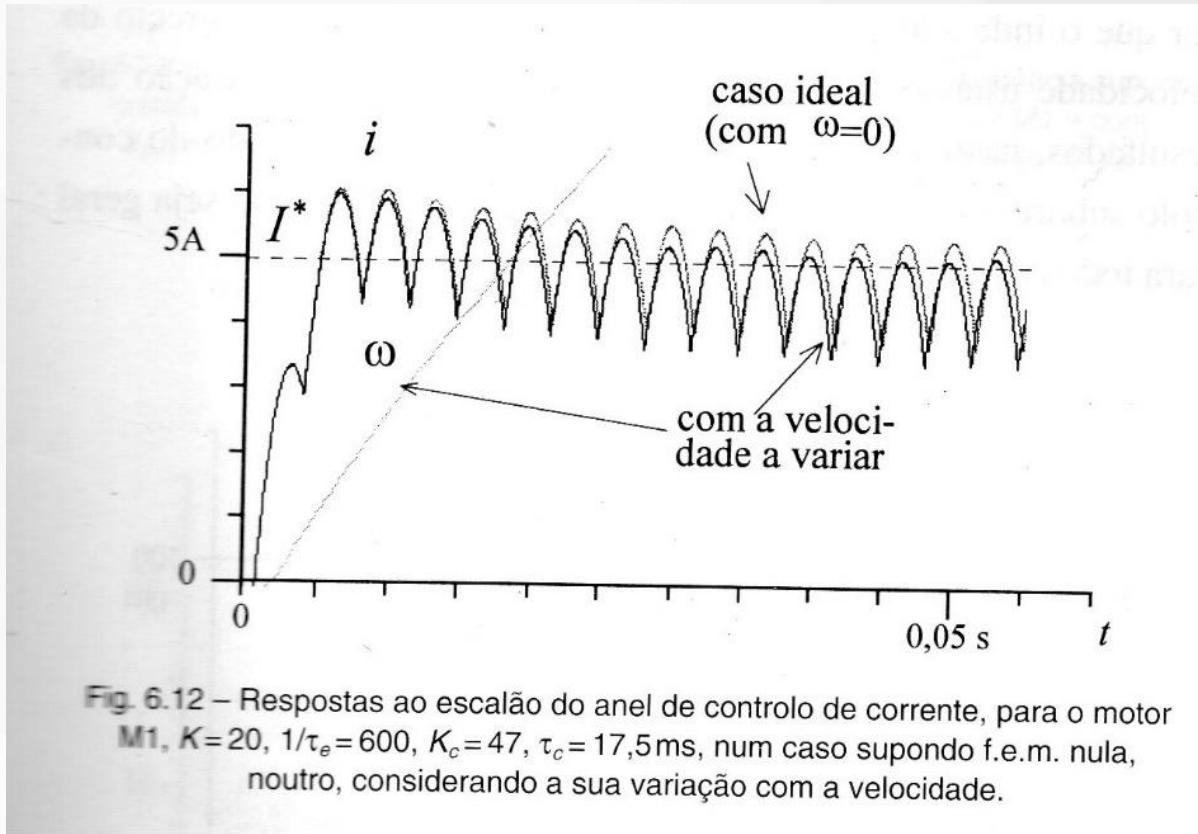
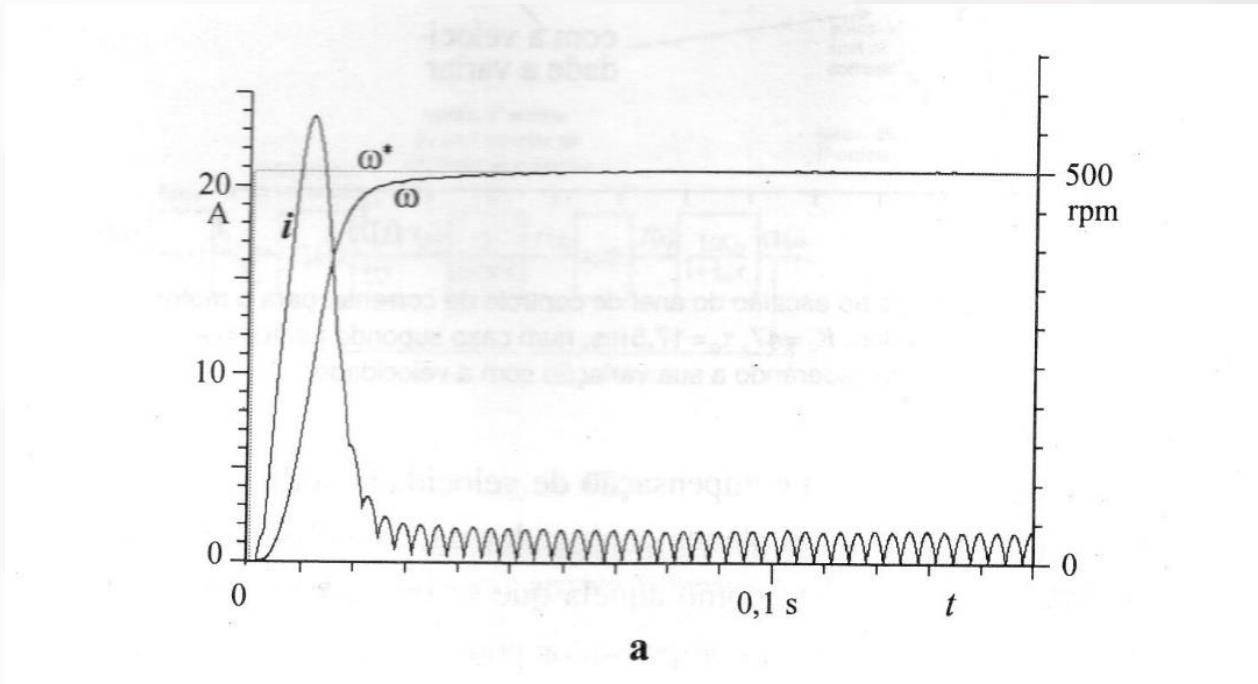


Fig. 6.11 – Regulação de velocidade com anel subordinado de controlo de corrente:
a: esquema de blocos do sistema completo; **b:** modelo simplificado do anel interior e respectivo lugar das raízes com controlador PI; **c:** modelo simplificado do anel exterior e respectivo lugar das raízes com controlador PI.

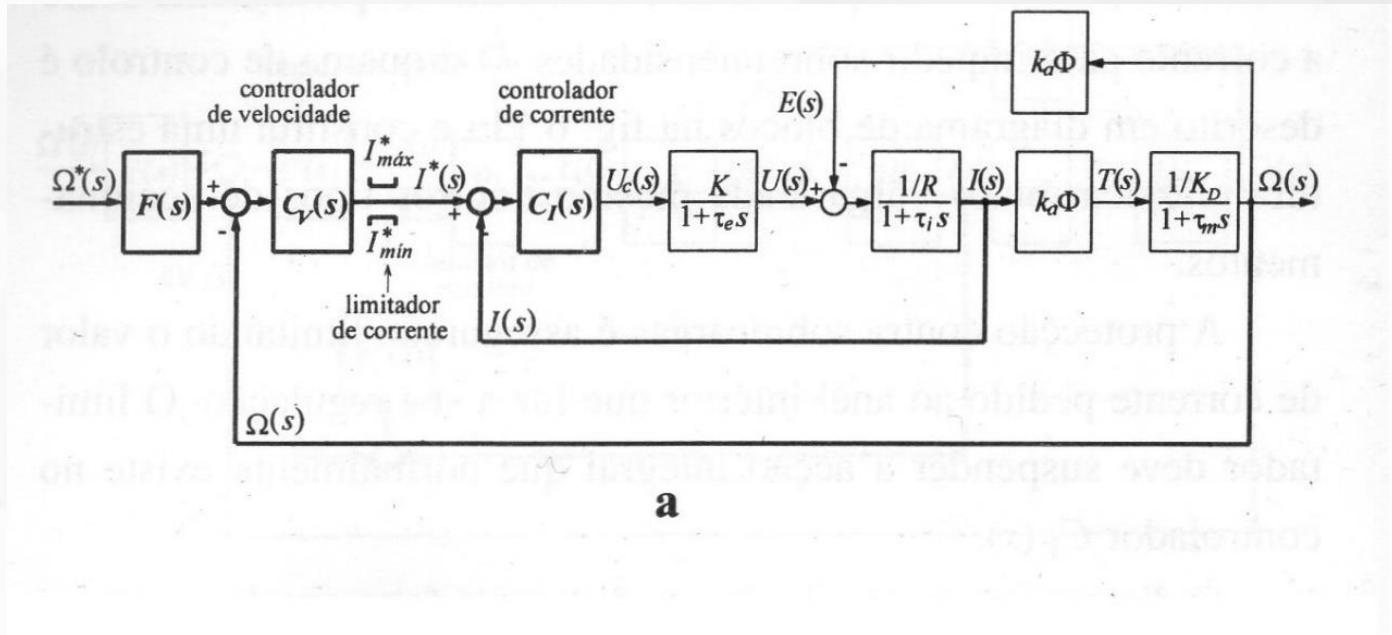
Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente



Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

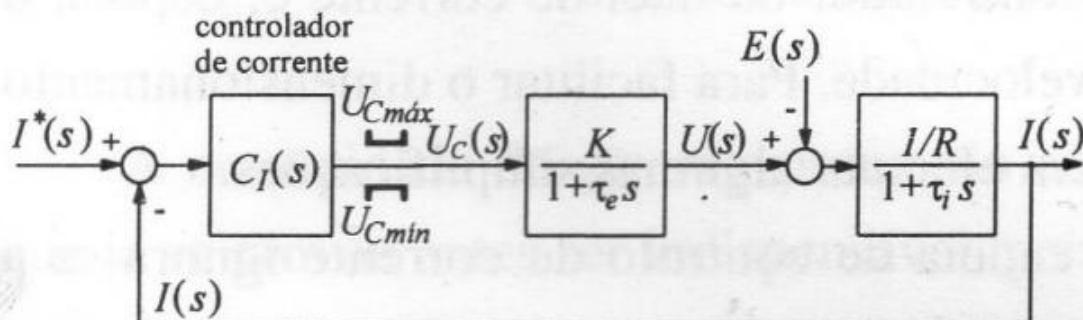


Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

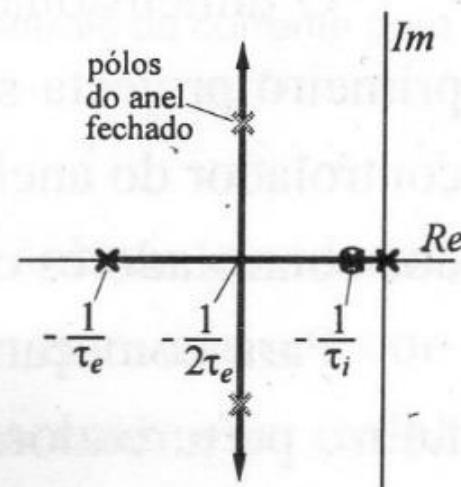


a

Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente



b



Control de Velocidad con Control Subordinado de Corriente

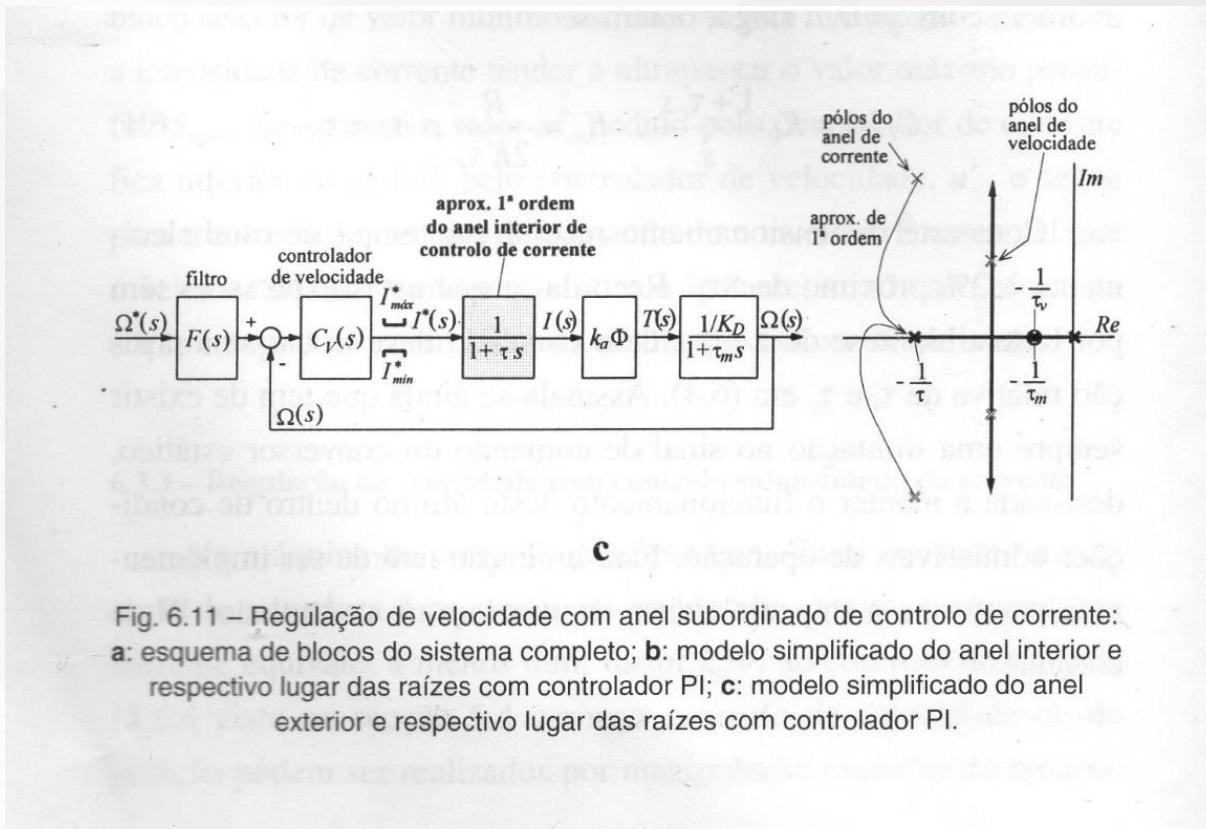


Fig. 6.11 – Regulação de velocidade com anel subordinado de controlo de corrente:
a: esquema de blocos do sistema completo; **b:** modelo simplificado do anel interior e respectivo lugar das raízes com controlador PI; **c:** modelo simplificado do anel exterior e respectivo lugar das raízes com controlador PI.



Gracias



**Universidad Francisco
de Paula Santander**
Vigilada Mineducación



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación

A graphic element in the bottom right corner features the UFPS logo above the text '¡Comprometidos con la ACREDITACIÓN!' in large, bold, black and red letters. A silhouette of a crowd of people is visible behind the text.

UFPS
¡Comprometidos con la
ACREDITACIÓN!