



# MOTORES DE CD

---

---



## INTRODUCCIÓN A LOS MOTORES DE CD

Los motores de CD son máquinas utilizadas tanto como motores que como generadores de CD, es decir, físicamente es la misma máquina y únicamente difieren en la forma de convertir la potencia.

Una de las razones por las cuales serán estudiados los motores de CD se debe a la gran cantidad de aplicaciones que éstos tienen, por ejemplo: automóviles, aparatos electrónicos, aeronáutica, robots, etc.



## MOTORES DE CD



Los motores de CD son a menudo comparados por sus regulaciones de velocidad. La *Regulación de Velocidad (speed regulation) (SR)* de un motor está definida como:

$$SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100\%$$

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$



# MOTORES DE CD

---

---



Existen cinco tipos de motores de manera general:

- ✚ Motor de CD con excitación independiente (separada).
- ✚ Motor de CD shunt.
- ✚ Motor de CD de imanes permanentes.
- ✚ Motor de CD serie.
- ✚ Motor de CD compuesto.



# MOTORES DE CD



## EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE CD

El circuito equivalente de un motor de CD se presenta en la Figura 9-2.

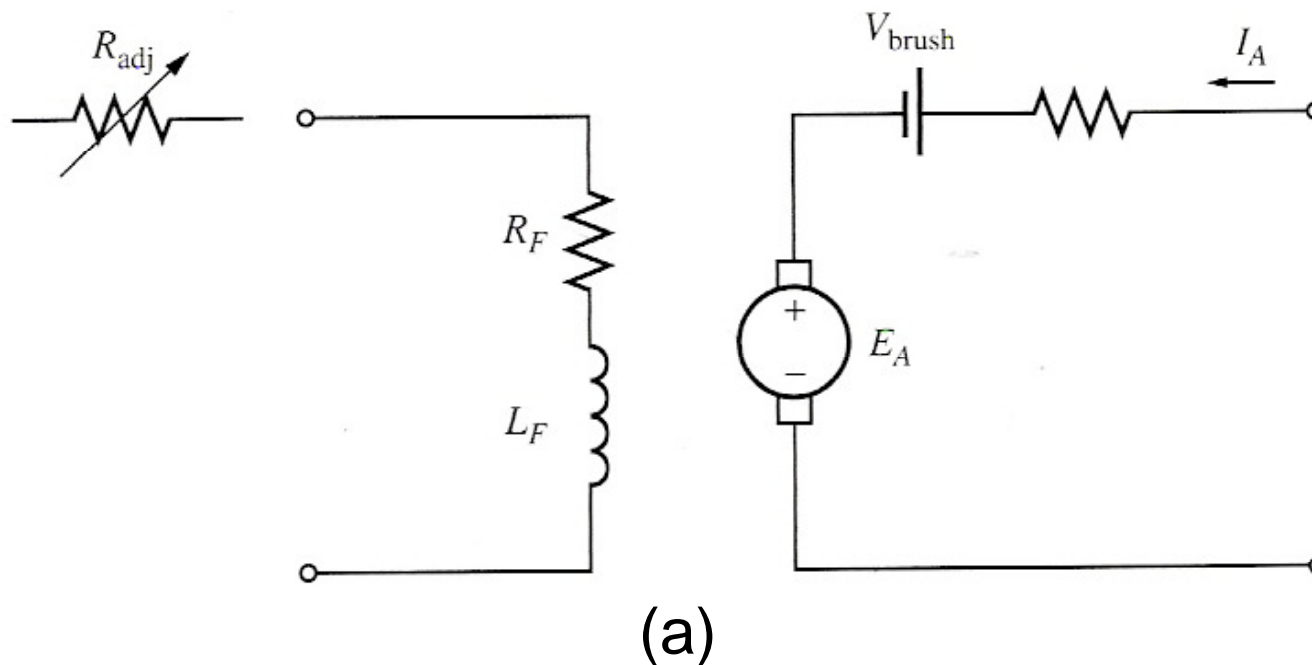
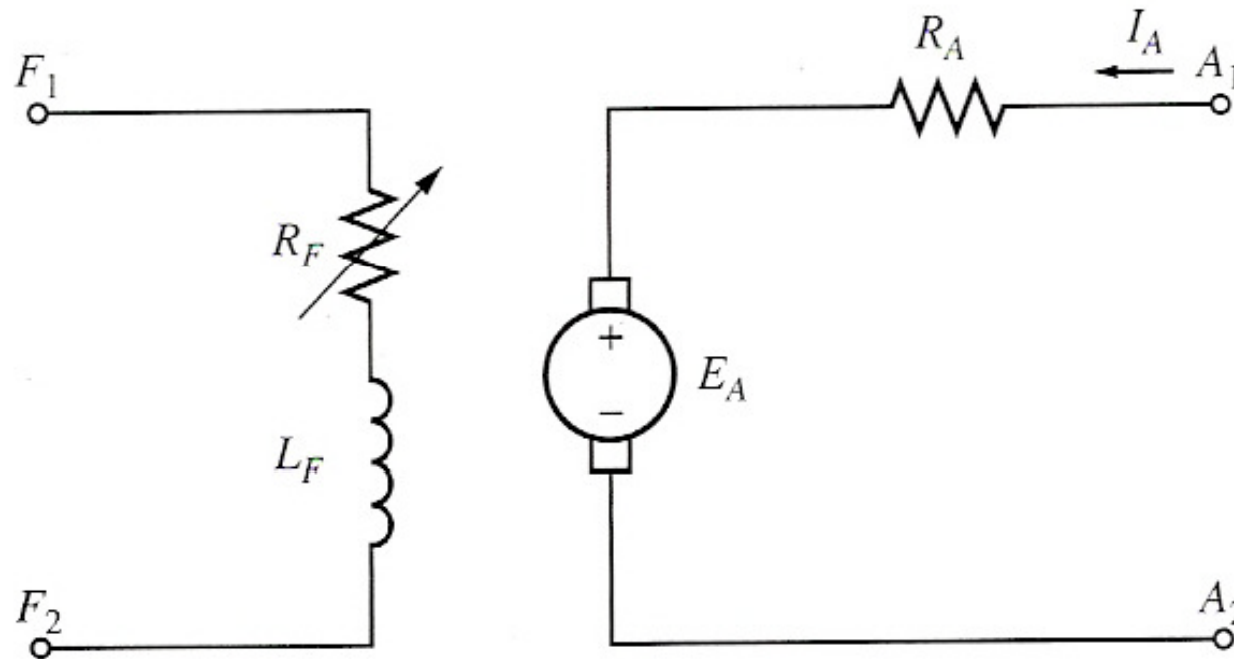


Figura 9-2. (a) Circuito equivalente de un motor de CD.



# MOTORES DE CD



(b)

Figura 9-2. Circuito equivalente simplificado eliminando la caída de voltaje a través de las escobillas y combinando  $R_{adj}$  con la resistencia de campo



# MOTORES DE CD

---

---



El voltaje interno generado en esta máquina  
esta dado por:

$$E_A = K\phi\omega$$

y el torque inducido desarrollado por la máquina  
está definido por:

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A$$



## MOTORES DE CD

---

---



*!!! Las dos ecuaciones anteriores más la ecuación de la Ley de voltajes de Kirchhoff del circuito de armadura y la curva de magnetización de la máquina son las herramientas necesarias para analizar el comportamiento y desempeño de un motor de CD. !!!*



# MOTORES DE CD

---

---



## LA CURVA DE MAGNETIZACION DE UNA MAQUINA DE CD

Como se mencionó anteriormente, el voltaje interno generado  $E_A$  de un motor o generador de CD está dado por:

$$E_A = K\phi\omega$$



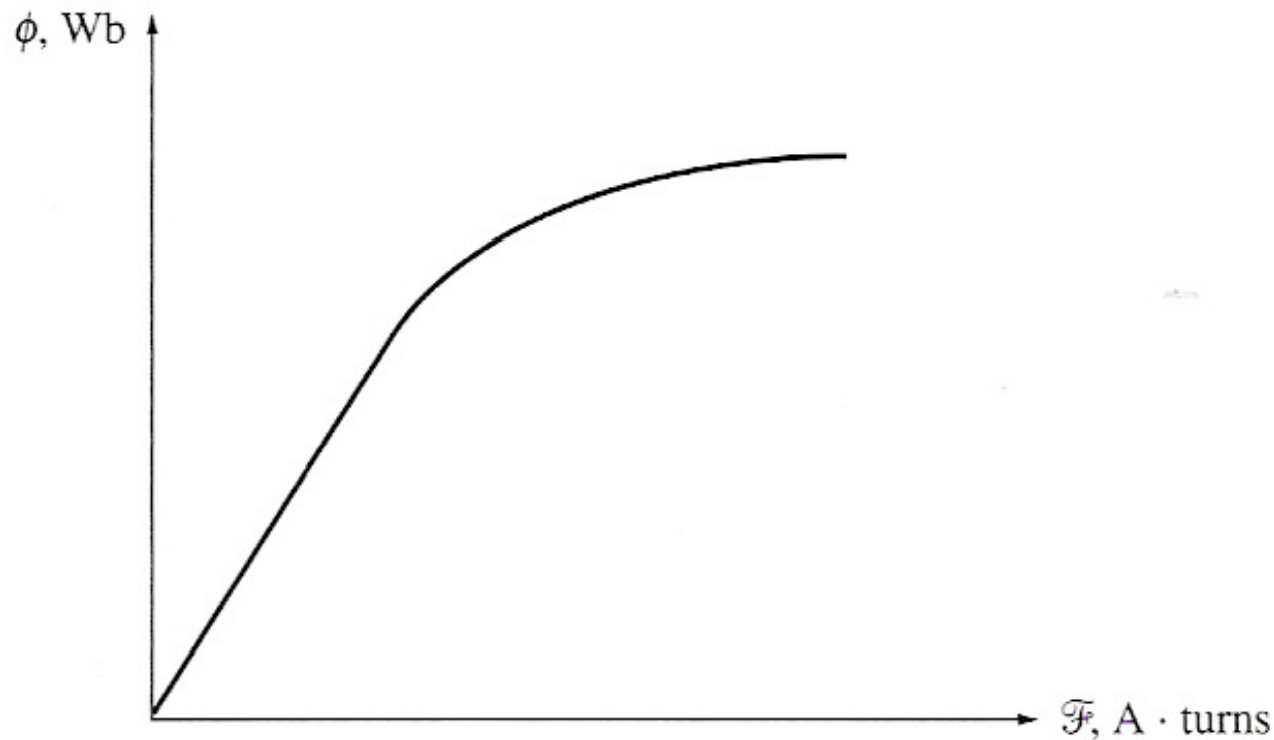
## MOTORES DE CD



La corriente de campo en una máquina de CD produce una fuerza magnetomotriz de campo dada por  $\mathcal{F} = N_F I_F$ . Esta fuerza magnetomotriz produce un flujo en la máquina de acuerdo con su curva de magnetización dada en la Figura 9-3. Puesto que la corriente de campo es directamente proporcional al flujo, es costumbre presentar la curva de magnetización como una gráfica de  $E_A$  versus corriente de campo para una velocidad  $\omega_o$  dada (véase la Figura 9-4).



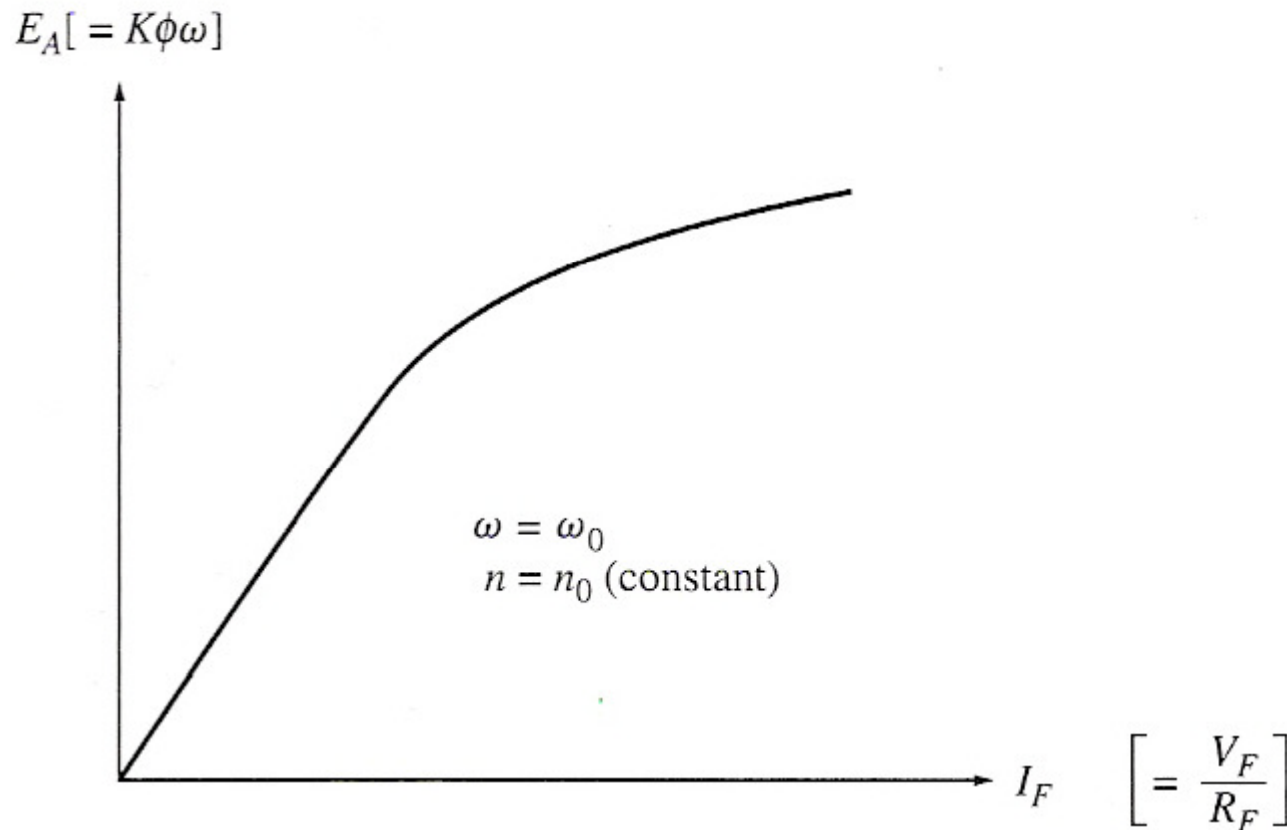
# MOTORES DE CD



**Figura 9-3.** Curva de magnetización de un material ferromagnético ( $\phi$  versus  $\mathcal{F}$  ).



# MOTORES DE CD



**Figura 9-4.** Curva de magnetización de una máquina de CD expresada como una gráfica de  $E_A$  versus  $I_F$ , para una velocidad  $\omega_0$  fija.

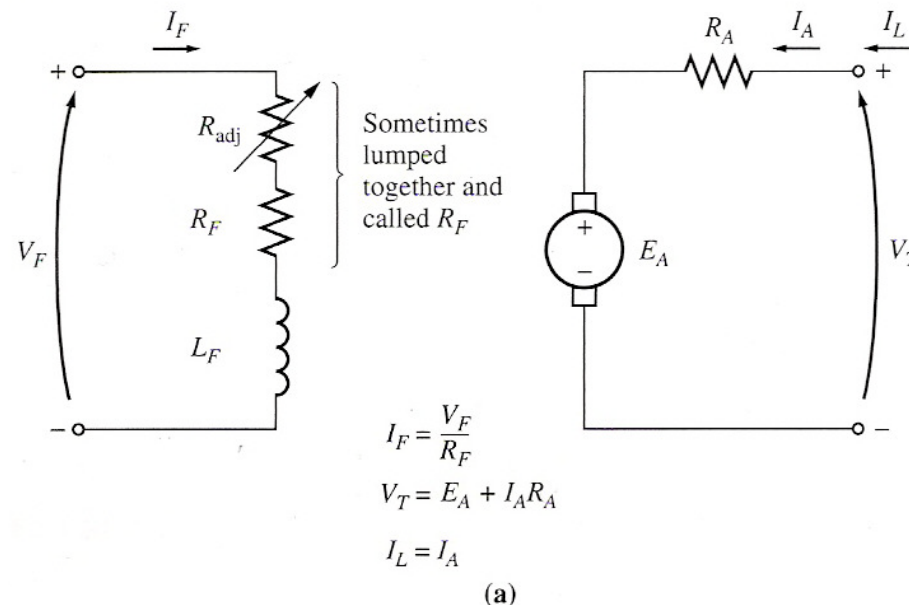


# MOTORES DE CD



## MOTORES DE CD CON EXCITACIÓN SEPARADA (INDEPENDIENTE) Y SHUNT

El circuito equivalente de un motor de CD con excitación separada se muestra en la Figura 9-5 (a).



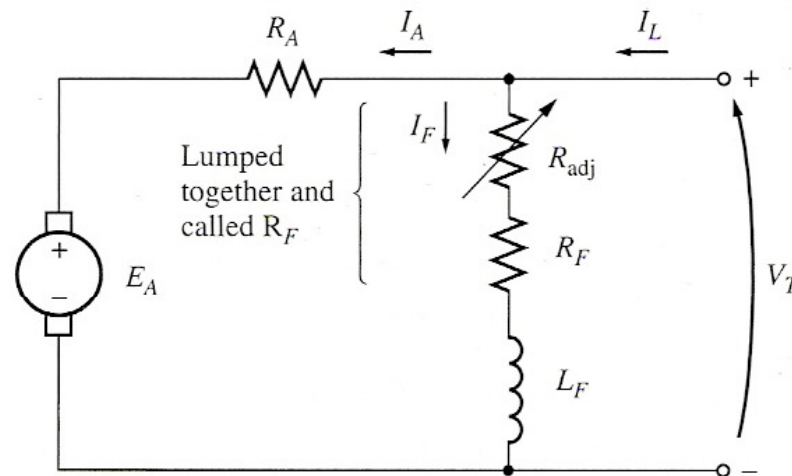
**Figura 9-5 (a).** Circuito equivalente de un motor de CD con excitación separada



# MOTORES DE CD



El circuito equivalente de un motor de CD shunt (en derivación) se muestra en la Figura 9-5 (b).



$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A + I_F$$

(b)

**Figura 9-5 (b).** Circuito equivalente de un motor de CD shunt (en derivación)



# MOTORES DE CD

---

---



## CARACTERISTICAS TERMINAL DE UN MOTOR DE CD SHUNT

Una *característica terminal* de una máquina es una gráfica de las cantidades de salida de la máquina versus cada una con la otra. Para un motor, las cantidades de salida son el torque en la flecha y la velocidad, por lo tanto, las características terminal de un motor es una gráfica de su *torque de salida versus la velocidad*.



## MOTORES DE CD



Las características de salida de un motor de CD shunt pueden ser derivadas a partir de la ecuaciones del voltaje inducido y el torque del motor más la Ley de Voltajes de Kirchhoff (LVK). La ecuación de la LVK para un motor shunt es

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

El voltaje inducido está definido como  $E_A = K\phi\omega$ . Sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior se tiene

$$V_T = K\phi\omega + I_A R_A$$



## MOTORES DE CD



Puesto que  $\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A$ , la corriente  $I_A$  puede ser expresada como

$$I_A = \frac{\tau_{\text{ind}}}{K\phi}$$

Sustituyendo esta corriente en la ecuación del voltaje terminal  $V_T$ , se tiene

$$V_T = K\phi\omega + \frac{\tau_{\text{ind}}}{K\phi} R_A$$



## MOTORES DE CD



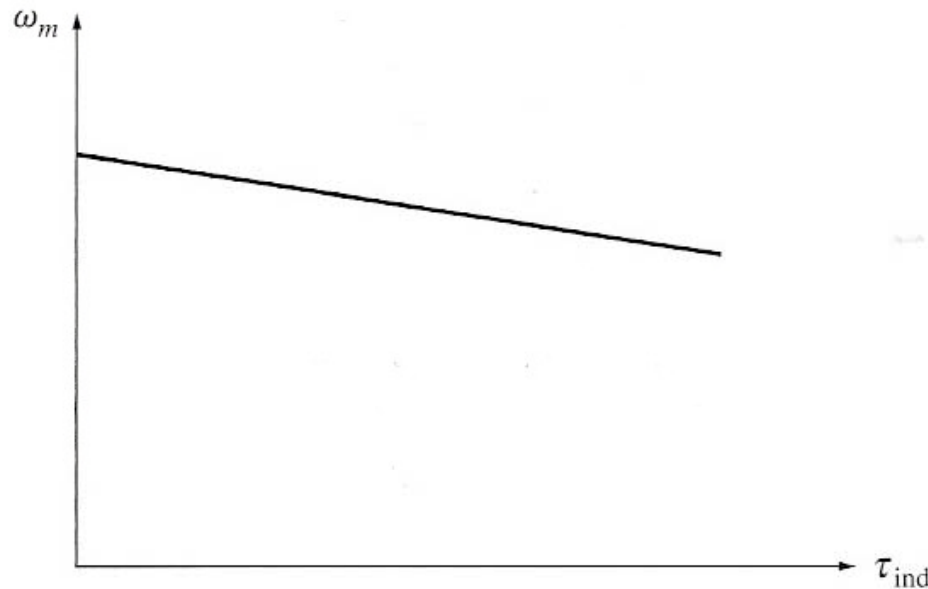
Finalmente, despejando la velocidad  $\omega$  del motor resulta en

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{\text{ind}}$$

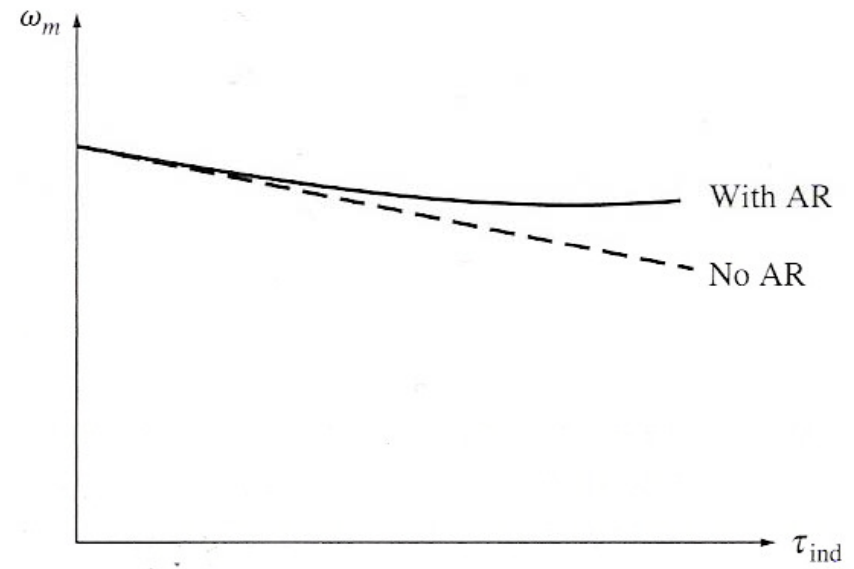
Esta expresión es la de una línea recta con una pendiente negativa y es justo la característica terminal del motor shunt de CD, tal como se muestra en la Figura 9-6 (a).



# MOTORES DE CD



(a)



(b)

**Figura 9-6.** (a) Característica torque-velocidad de un motor shunt o con excitación separada con devanados de compensación para eliminar la reacción de armadura. (b) Comparación de la característica torque-velocidad del motor con y sin reacción de armadura presente.



## MOTORES DE CD



**EJEMPLO 9-1.** Un motor shunt de 50-hp, 250 V, 1200 rev/min con devanados de compensación tiene una resistencia de armadura (incluyendo los carbones, devanados de compensación e interpolos) de  $0.06 \Omega$ . Su circuito de campo tiene una resistencia total  $R_{adj} + R_F$  de  $50 \Omega$ , el cual produce una velocidad en vacío (sin carga) de 1200 rev/min. Existen 1200 vueltas por polo en los devanados de campo shunt (véase la Figura 9-7).

**(a)** Encuentre la velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es de 100 A.



# MOTORES DE CD



- (b) Encuentre la velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es de 200 A.
- (c) Encuentre la velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es de 300 A.

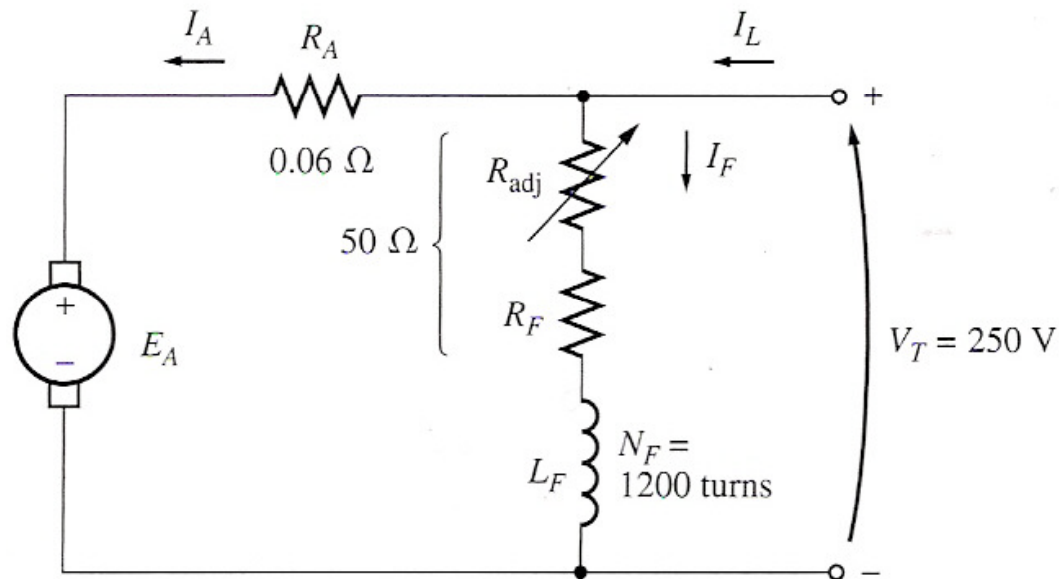


Figura 9-7. Motor Shunt.



# MOTORES DE CD



## ANALISIS NO LINEAL DE UN MOTOR SHUNT DE CD

El flujo  $\phi$  y el voltaje interno generado  $E_A$  de una máquina de CD es una *función no lineal* de su fuerza magnetomotriz. Por lo tanto, cualquier cambio en la fuerza magnetomotriz en una máquina tendrá un efecto no lineal en el voltaje interno generado de la máquina. Puesto que el cambio en  $E_A$  no puede ser calculado analíticamente, la curva de magnetización de la máquina deberá utilizarse para determinar su  $E_A$  de manera aproximada para una fuerza magnetomotriz dada.



## MOTORES DE CD

---

---



Los dos principales contribuidores de la fuerza magnetomotriz en la máquina son su corriente de campo y su reacción de armadura, si se presenta.

Dado que la curva de magnetización es una gráfica de  $E_A$  versus  $I_F$  para una velocidad  $\omega_o$ , el efecto del cambio en la corriente de campo de la máquina puede ser determinado directamente de su curva de magnetización.

Si una máquina tiene reacción de armadura, su flujo se reducirá con cada incremento en la carga. La fuerza magnetomotriz total en un motor shunt de CD es la



## MOTORES DE CD



fuerza magnetomotriz del circuito de campo menos la fuerza magnetomotriz debido a la reacción de armadura (AR):

$$\mathcal{F}_{\text{net}} = N_F I_F - \mathcal{F}_{\text{AR}}$$

Dado que las curvas de magnetización son expresadas como gráficas de  $E_A$  versus corriente de campo, es costumbre definir una *corriente de campo equivalente* que producirá el mismo voltaje de salida como la combinación de todas las fuerzas magnetomotrices en la máquina.



## MOTORES DE CD



El voltaje resultante  $E_A$  puede ser determinado por la localización de la *corriente de campo equivalente* en la curva de magnetización. La corriente de campo equivalente de un motor shunt de CD está dada por

$$I_F^* = I_F - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F}$$

Otro efecto que debe ser considerado cuando se realiza el análisis no lineal es determinar el voltaje interno generado de una máquina de CD.



## MOTORES DE CD

---

---



La curva de magnetización para una máquina de CD está determinada para una velocidad en particular, generalmente la velocidad nominal de la máquina. ¿Cómo pueden ser determinados los efectos de una corriente de campo dada si el motor está funcionando a otra velocidad diferente a la nominal?

La ecuación para el voltaje inducido en una máquina de CD cuando la velocidad se expresa en revoluciones por minuto es

$$E_A = K' \phi n$$



## MOTORES DE CD



Para una corriente de campo dada, el flujo magnético en la máquina se considera constante (fijo), por lo tanto, el voltaje interno generado está relacionado por la velocidad como

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n}{n_0}$$

donde  $E_{A0}$  y  $n_0$  representan los valores de referencia del voltaje y la velocidad, respectivamente.



## MOTORES DE CD

---

---



**EJEMPLO 9-2.** Un motor shunt de CD de 50-hp, 250 V, 1200 rev/min *sin* devanados de compensación tiene una resistencia de armadura (incluyendo los carbones e interpolos) de  $0.06 \Omega$ . Su circuito de campo tiene una resistencia total  $R_{adj} + R_F$  de  $50 \Omega$ , el cual produce una velocidad en vacío (sin carga) de 1200 rev/min. Existen 1200 vueltas por polo en los devanados de campo shunt, y la reacción de armadura produce una fuerza magnetomotriz desmagnetizante de 840 A-vueltas en una corriente de carga de 200 A. La curva de magnetización de esta máquina se muestra en la Figura 9-9.



## MOTORES DE CD

---

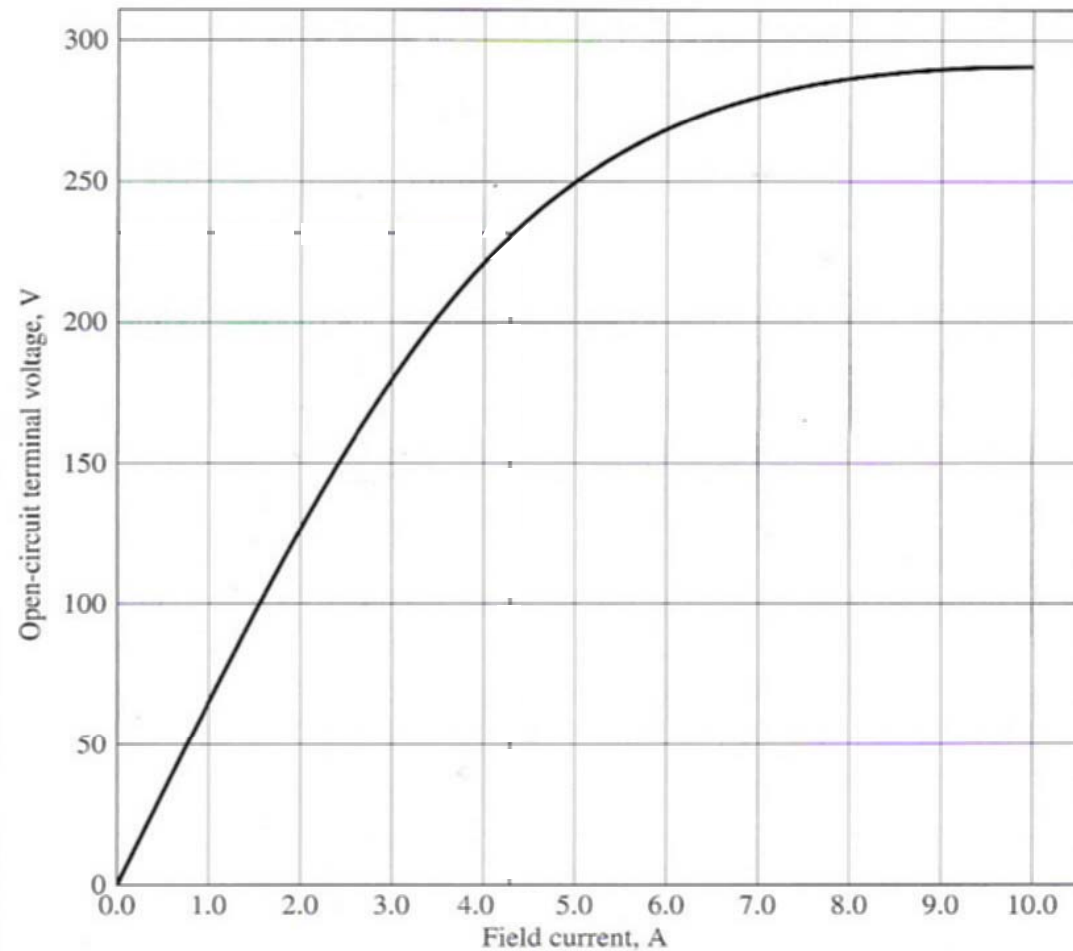
---



- (a) Encuentre la velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es de 200 A.
- (b) Este motor es esencialmente idéntico al del Ejemplo 9-1 excepto por la ausencia de los devanados de compensación. ¿Cómo es su velocidad comparada con aquella del ejemplo anterior para una corriente de carga de 200 A?



# MOTORES DE CD



**Figura 9-9.** Curva de magnetización típica de un motor de CD de 250 V, tomada a una velocidad de 1200 rev/min.



# MOTORES DE CD

---

---



## CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR

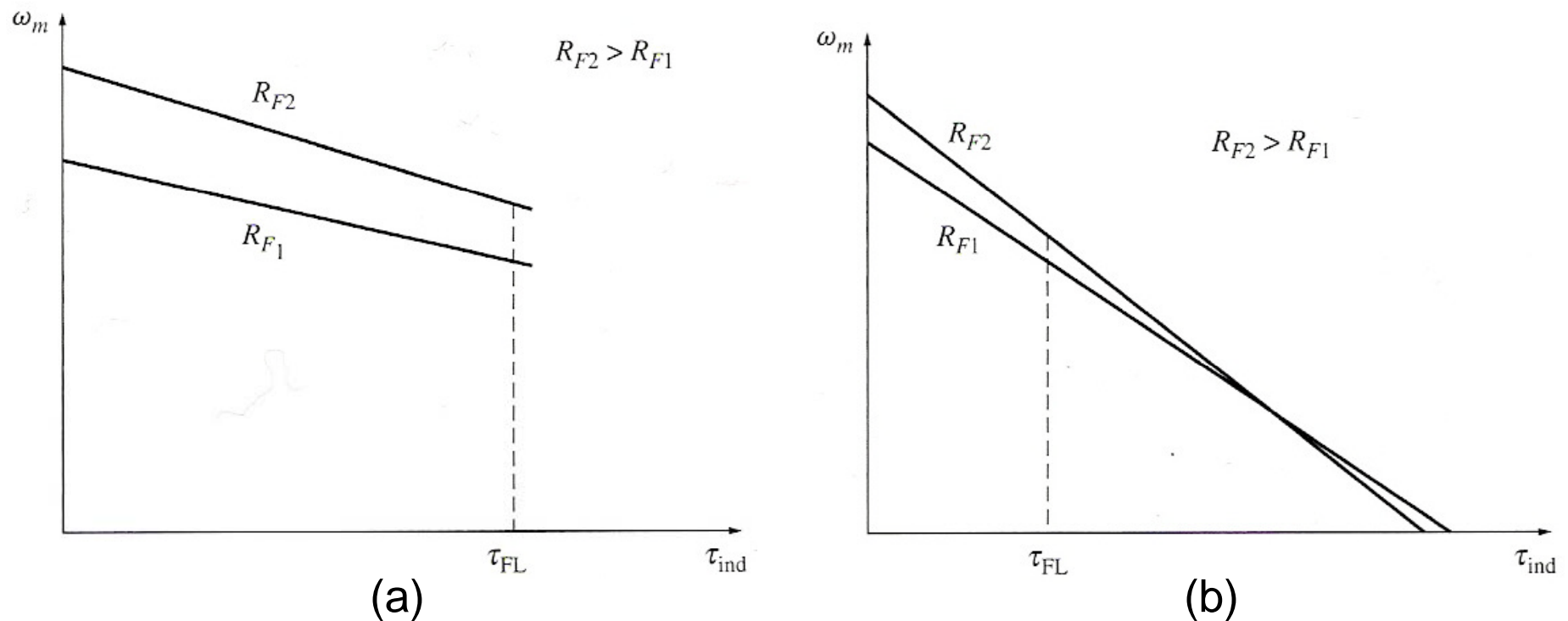
### SHUNT DE CD

Existen dos métodos para el control de velocidad del motor shunt de CD, uno de ellos menos común que el otro. Dichos métodos son:

- ✚ Por el ajuste de la resistencia de campo  $R_F$  (y por lo tanto el flujo de campo)
- ✚ Por el ajuste del voltaje en terminales aplicado a la armadura



# MOTORES DE CD

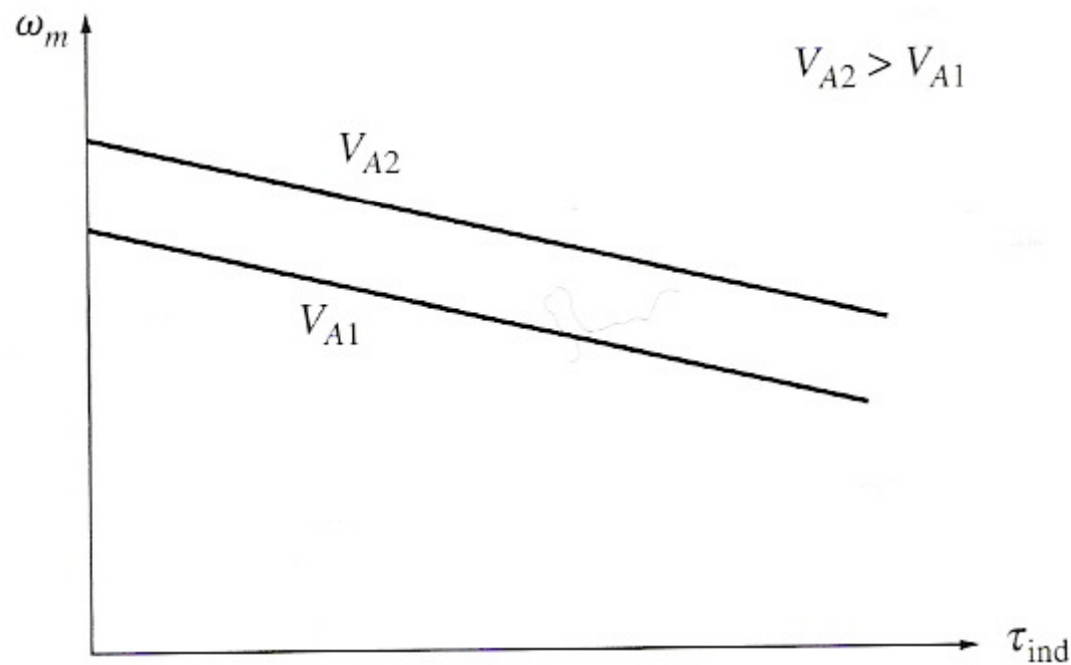


**Figura 9-12.** El efecto de la resistencia de campo en el control de la velocidad en las características de torque-velocidad del motor shunt:

(a) Sobre el rango normal de operación del motor; (b)



# MOTORES DE CD



**Figura 9-14.** El efecto del voltaje de armadura en el control de velocidad en las características de torque-velocidad de un motor shunt de CD.



# MOTORES DE CD



El método menos utilizado es:

- ✚ Insertando una resistencia en serie con el circuito de armadura.

