

Clases 16 a 18– TIM 71

Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

19, 21 y 26 de mayo de 2025

Clase 16

Corrección grupal del primer parcial

19 de mayo de 2025

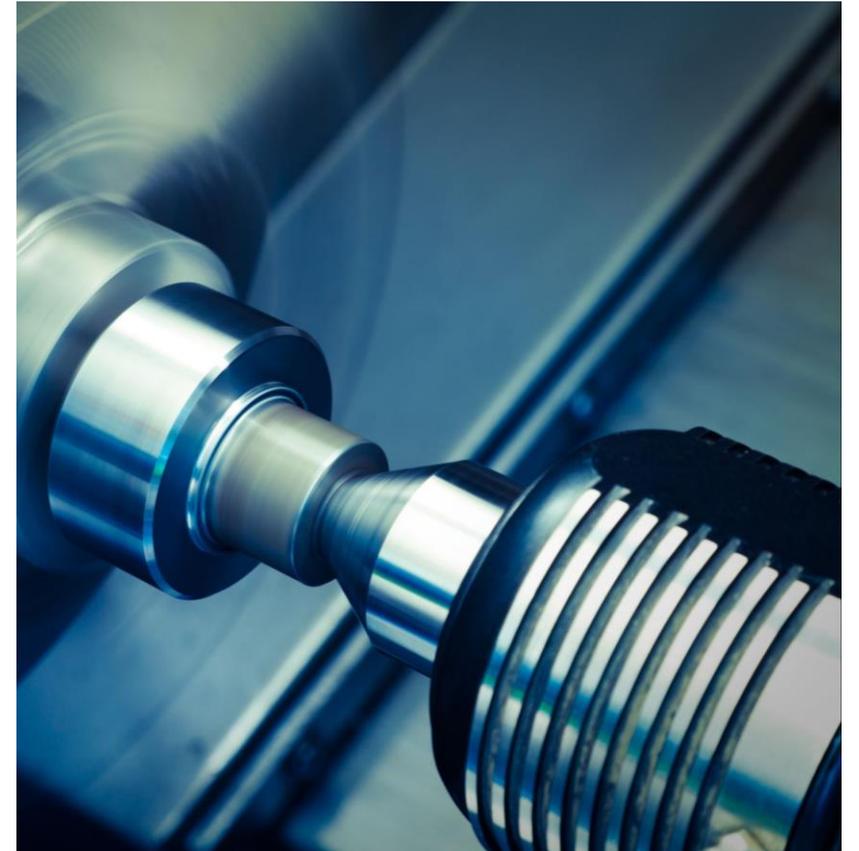
Clase 17

Parte 1: Repaso

21 de mayo de 2025

Repaso

- Cuatro principios básicos del electromagnetismo en máquinas eléctricas:
 1. **Conductor con corriente → Campo magnético**
 2. **Campo magnético variable → Voltaje inducido en una bobina (transformadores)**
 3. **Conductor con corriente en campo → Fuerza inducida (motores)**
 4. **Conductor en movimiento en campo → Voltaje inducido (generadores)**



Fuerza sobre un conductor con corriente (“acción motor”)

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

donde

i = magnitud de la corriente en el alambre

\mathbf{l} = longitud del alambre, con la dirección de \mathbf{l} definida como la dirección del flujo de corriente

\mathbf{B} = vector de densidad de flujo magnético

La dirección de la fuerza está dada por la regla de la mano derecha

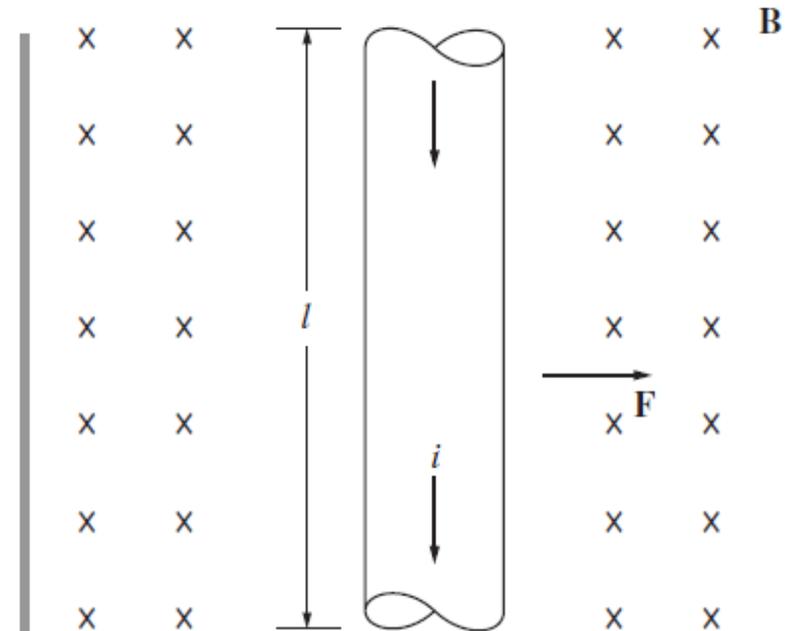


FIGURA 1-16 Alambre que porta corriente en presencia de un campo magnético.

Voltaje inducido en un conductor en movimiento (“acción generador”)

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

donde

\mathbf{v} = velocidad del alambre

\mathbf{B} = vector de densidad de flujo magnético

\mathbf{l} = longitud del conductor en el campo magnético

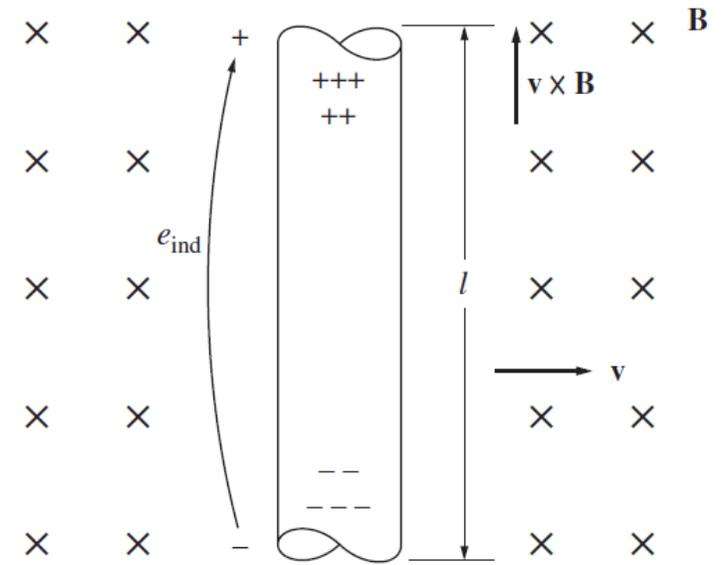
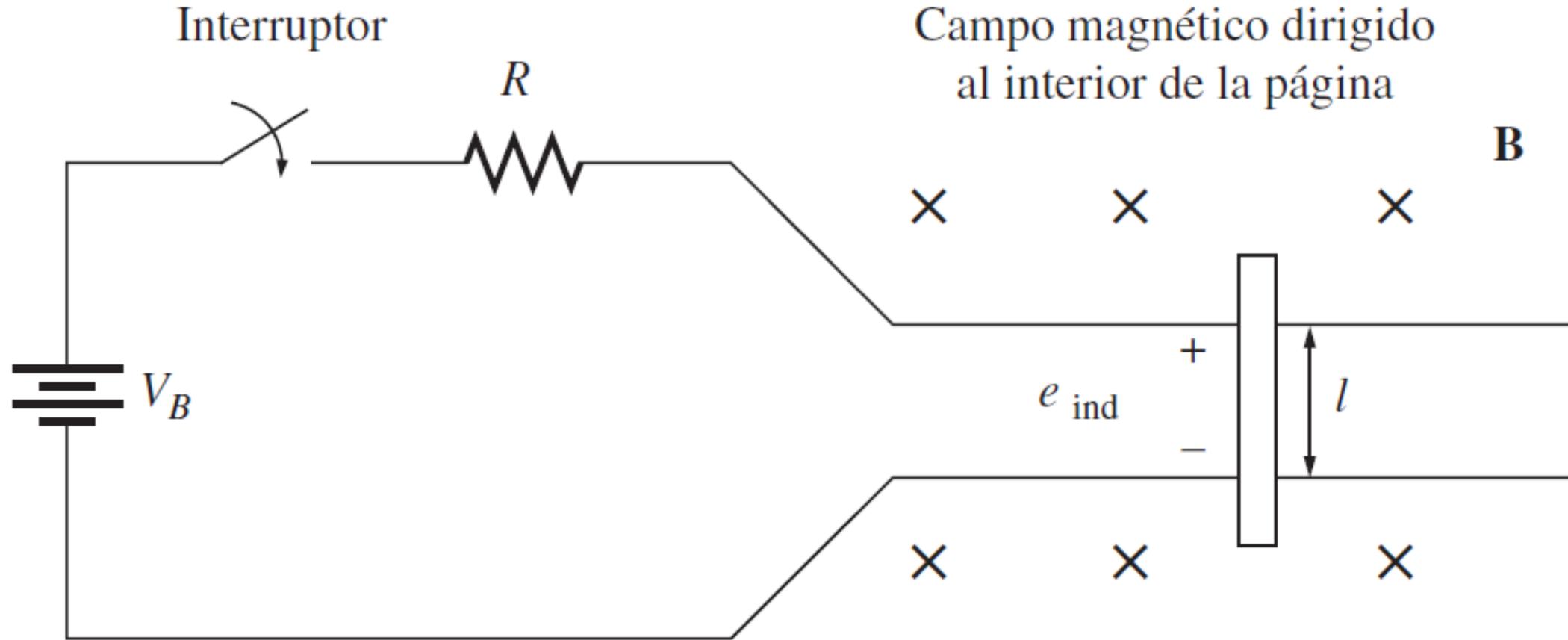


FIGURA 1-17 Conductor que se mueve en presencia de un campo magnético.

El vector \mathbf{l} apunta hacia el extremo del alambre que forma el ángulo más pequeño con respecto al vector $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. El voltaje en el alambre se inducirá de modo que su extremo positivo esté en la dirección del vector $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Los siguientes ejemplos ilustran este concepto.

Máquina lineal de continua



La máquina lineal de corriente directa como motor

Suponga que la máquina lineal opera inicialmente en estado estacionario en vacío como el descrito con anterioridad. ¿Qué le ocurrirá a esta máquina si se le aplica una carga externa?

$$i \uparrow = \frac{V_B - e_{\text{ind}} \downarrow}{R} \quad (1-47)$$

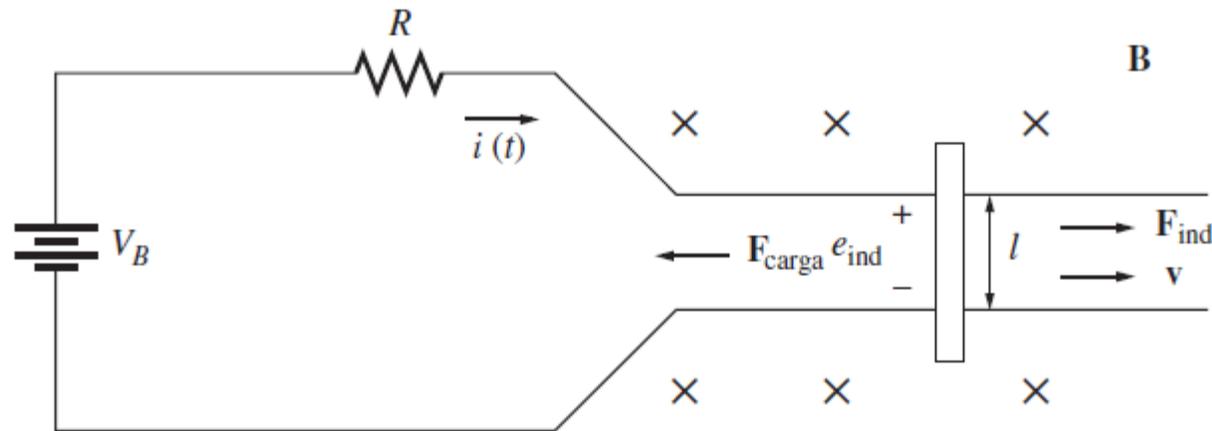


FIGURA 1-22 Máquina lineal de cd como motor.

La máquina lineal de corriente directa como generador

Suponga que la máquina lineal opera de nuevo en condiciones de vacío en estado estacionario. Observe qué ocurre al aplicar una fuerza *en la dirección del movimiento*.

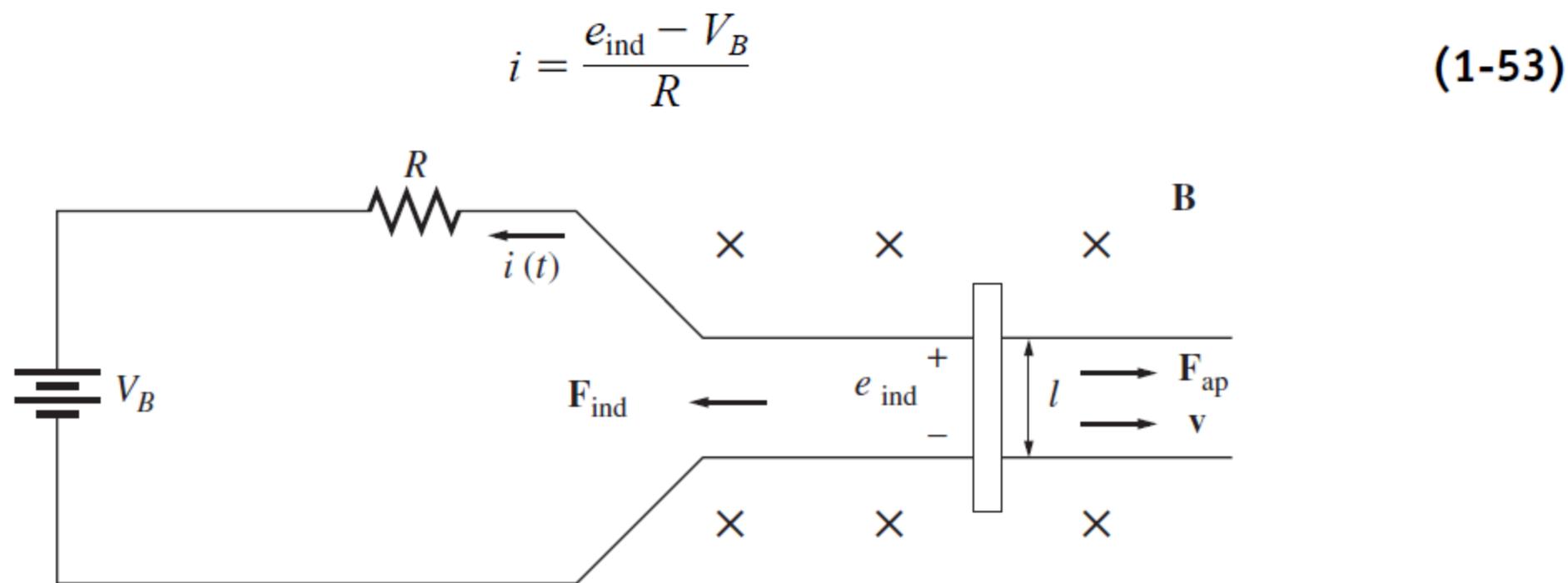


FIGURA 1-24 Máquina lineal de cd como generador.

Posición angular

- Es el "ángulo" que describe la ubicación de un objeto girando sobre un eje.
- Se mide en **radianes** o **grados**.
- Es análogo a la **posición lineal** en el movimiento rectilíneo.

Velocidad angular

- Es la **tasa de cambio** de la posición angular con el tiempo.
- Se mide en **radianes por segundo (rad/s)**.
- También se usa:

ω_m velocidad angular expresada en radianes por segundo
 f_m velocidad angular expresada en revoluciones por segundo
 n_m velocidad angular expresada en revoluciones por minuto

En estos símbolos el subíndice m indica una cantidad mecánica en contraposición a una cantidad eléctrica. Si no existe posibilidad alguna de confusión entre las cantidades mecánica y eléctrica, se omite el subíndice.

Estas medidas de velocidad del eje se relacionan entre sí mediante las siguientes ecuaciones:

$$n_m = 60f_m \quad (1-3a)$$

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \quad (1-3b)$$

Aceleración angular

- Es la **tasa de cambio** de la velocidad angular.
- Se mide en **rad/s²**.
- Se denota como α , análoga a la aceleración lineal a .

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

Par (torque)

- Es la acción rotatoria de una fuerza.
- Depende de:
 - La **magnitud** de la fuerza
 - La **distancia** al eje donde se aplica

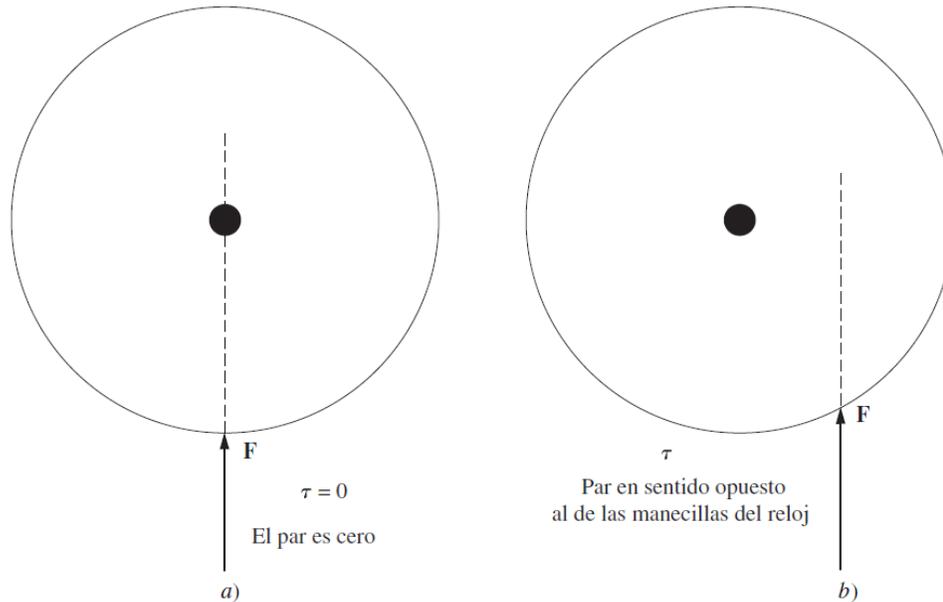


FIGURA 1-1 a) Fuerza aplicada a un cilindro de modo que pase por su eje de rotación $\tau = 0$. b) Fuerza aplicada a un cilindro de manera que su línea de acción no pase por el eje de rotación. Aquí τ va en sentido opuesto al de las manecillas del reloj.

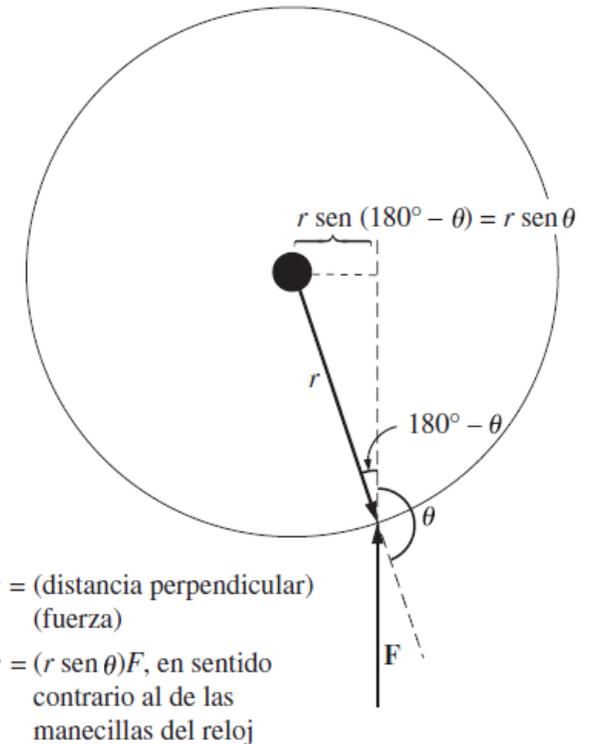


FIGURA 1-2 Deducción de la ecuación del par en un objeto.

Ley de rotación de Newton

- En el movimiento lineal:
 - $F = m \cdot a$
 - La fuerza neta produce aceleración proporcional a la masa.
- En rotación:
 - $\tau = J \cdot \alpha$
 - El **par neto** produce aceleración angular proporcional al **momento de inercia J** .
- El momento de inercia juega el mismo rol que la masa en el movimiento rectilíneo.
- Unidades:
 - τ : newton-metro (N·m)
 - J : kg·m²
 - α : rad/s²

Par

1 newton-metro (N · m)

= 0.738 libras-pie (lb · ft)

Trabajo (W)

- **Movimiento rectilíneo:**

Trabajo = fuerza aplicada a lo largo de una distancia.

$$W = \int F dr \quad (\text{fuerza variable}), \quad W = F \cdot r \quad (\text{fuerza constante})$$

- **Movimiento rotatorio:**

Trabajo = par aplicado a lo largo de un ángulo.

$$W = \int \tau d\theta \quad (\text{par variable}), \quad W = \tau \cdot \theta \quad (\text{par constante})$$

- **Unidades:**

- SI: joule (J) = newton·metro (N·m)
- Inglés: pie-libra (ft·lb)

1 joule (J)	= 0.738 pies-libra (ft · lb)
	= 3.725×10^{-7} caballos de fuerza-hora (hp · h)
	= 2.778×10^{-7} kilowatts-hora (kWh)

Potencia (P)

- **Definición general:**

Es la tasa de realización de trabajo.

$$P = \frac{dW}{dt}$$

- **Movimiento rectilíneo (fuerza constante):**

$$P = F \cdot v$$

- **Movimiento rotatorio (par constante):**

$$P = \tau \cdot \omega$$

- **Unidades:**

- SI: watt (W) = joule/segundo = N·m/s
- Inglés:
 - pie-libra/seg
 - caballo de fuerza (hp)

1 watt (W)	= 1.341×10^{-3} hp
	= 0.7376 'pies • lbf/s
1 caballo de fuerza	= 746 W

Introducción a las Máquinas de CA

- **Función principal:**
 - **Generadores CA:** convierten **energía mecánica** → **eléctrica (CA)**
 - **Motores CA:** convierten **energía eléctrica (CA)** → **mecánica**
- **Principio básico:**

La conversión de energía se basa en el **campo magnético giratorio**.
- **Dos tipos principales:**
 - **Máquinas síncronas:**

Campo magnético alimentado por una fuente externa de CA.
 - **Máquinas de inducción (asíncronas):**

Campo magnético generado por **inducción electromagnética** en el rotor.
- **Estructura típica:**

El **circuito de campo** suele estar en el **rotor**, tanto en síncronas como en de inducción.

Espira Sencilla en un Campo Magnético Uniforme

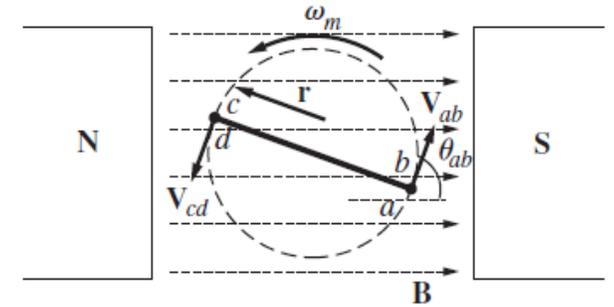
🌀 Modelo más simple de generador de CA:

- Una **espira rectangular** girando en un campo magnético **uniforme y constante**.

⚙️ Componentes:

- **Campo magnético (B):** fijo, dirección horizontal.
- **Espira rotante:** lados perpendiculares y paralelos al plano.
- **Velocidad angular (ω):** rotación uniforme del rotor.

📌 Aunque no representa una máquina real, los principios de voltaje y par inducido son los mismos que en una máquina de CA trifásica.



B es un campo magnético uniforme, alineado como puede apreciarse.

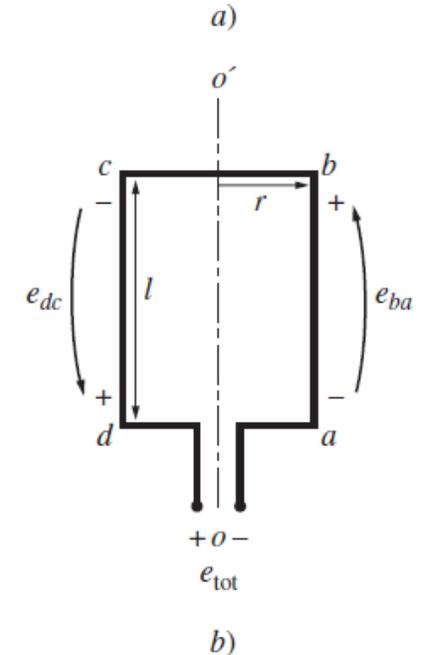


FIGURA 3-1 Espira sencilla giratoria en un campo magnético uniforme. a) Vista frontal; b) vista de la bobina.

Voltaje inducido (FEM):

- Surge por el fenómeno de la inducción electromagnética.
- Calculado como:

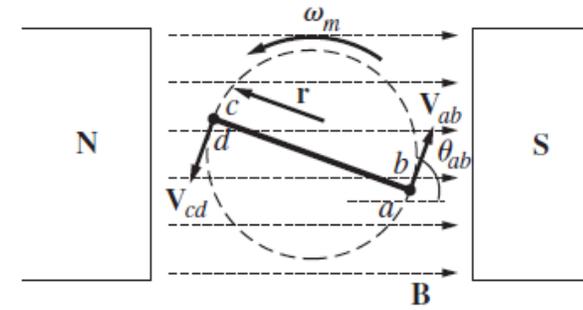
$$e_{\text{ind}} = 2vBl \sin \theta$$

donde:

- v : velocidad tangencial de los conductores
- l : longitud activa del conductor
- θ : ángulo entre el conductor y el campo

Segmentos de la espira:

- **ab y cd**: contribuyen con voltaje $\rightarrow \sin \theta$
- **bc y da**: no inducen voltaje (movimiento \perp a B)



B es un campo magnético uniforme, alineado como puede apreciarse.

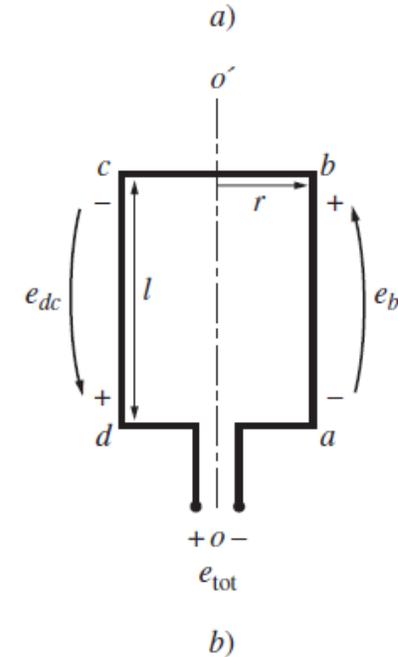


FIGURA 3-1 Espira sencilla giratoria en un campo magnético uniforme. *a)* Vista frontal; *b)* vista de la bobina.

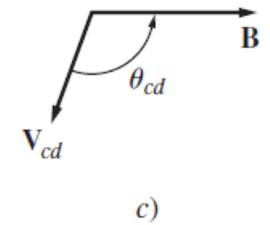
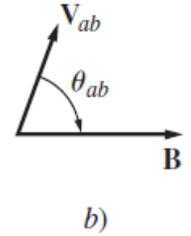
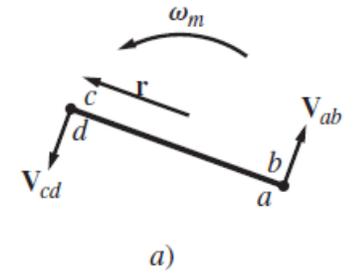


FIGURA 3-2 *a)* Velocidades y orientaciones de los lados de la espira con respecto al campo magnético. *b)* Dirección del movimiento con respecto al campo magnético del lado *ab*. *c)* Dirección del movimiento con respecto al campo magnético del lado *cd*.

Voltaje Inducido en una Espira Giratoria

📌 Expresión general del voltaje inducido:

A partir de:

$$e_{\text{ind}} = 2vBl \sin \theta$$

Y usando:

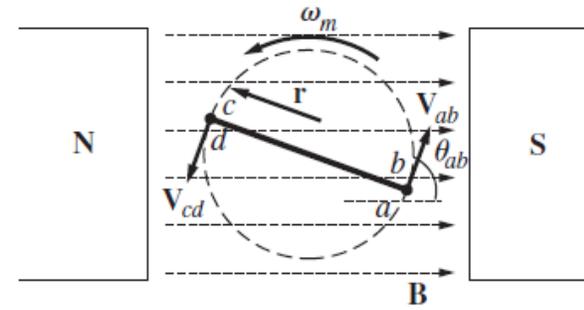
- $\theta = \omega t$
- $v = r\omega$
- $A = 2rl$

📌 Se llega a:

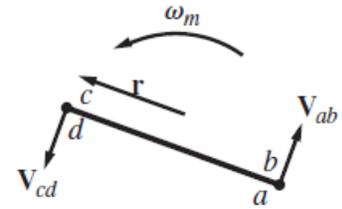
$$e_{\text{ind}} = AB\omega \sin(\omega t)$$

📌 Como:

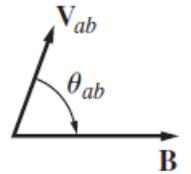
$$\phi_{\text{máx}} = AB \Rightarrow e_{\text{ind}} = \phi_{\text{máx}}\omega \sin(\omega t)$$



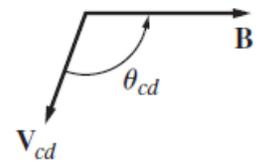
B es un campo magnético uniforme, alineado como puede apreciarse.



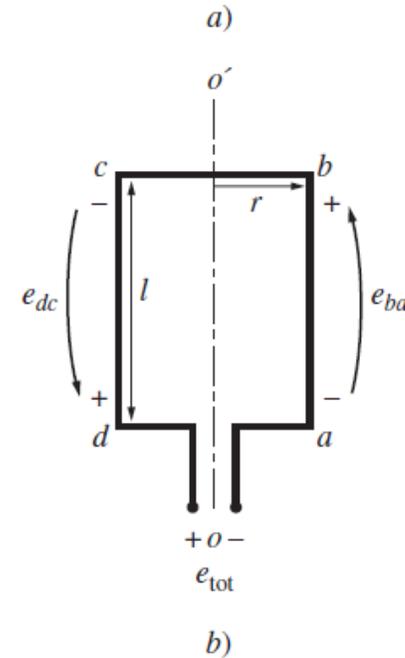
a)



b)



c)



b)

Deducción del Voltaje Inducido desde la Ley de Faraday

📖 Ley de Faraday:

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\phi}{dt}$$

✦ Para una **espira rotando** en un campo magnético uniforme:

- Área de la espira: A
- Densidad de flujo: B (constante)
- Ángulo con el campo: $\theta(t) = \omega t$

📌 Flujo instantáneo:

$$\phi(t) = BA \cos(\omega t)$$

📊 Derivada temporal del flujo:

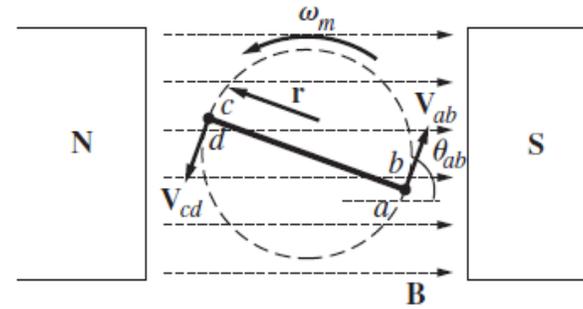
$$\frac{d\phi}{dt} = -BA\omega \sin(\omega t)$$

🎯 Resultado:

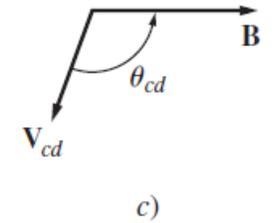
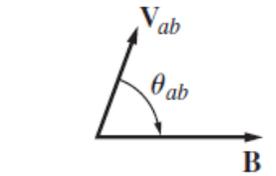
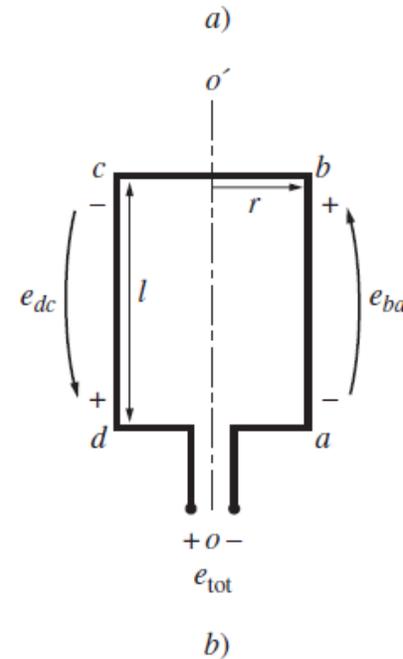
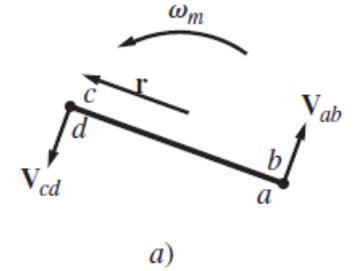
$$e_{\text{ind}} = BA\omega \sin(\omega t)$$

🌱 Como antes, si $\phi_{\text{máx}} = BA$:

$$e_{\text{ind}} = \phi_{\text{máx}}\omega \sin(\omega t)$$



B es un campo magnético uniforme, alineado como puede apreciarse.



$$\phi_{\text{máx}} = AB \quad \Rightarrow \quad e_{\text{ind}} = \phi_{\text{máx}} \omega \sin(\omega t)$$

✓ **Conclusión:**

El voltaje inducido es senoidal, y su magnitud depende de:

1. 🌀 Flujo magnético $\phi_{\text{máx}}$
2. 🔄 Velocidad angular ω
3. 🛠 Geometría y construcción de la máquina

Esta ecuación es válida también para **máquinas de CA reales**.

Par Inducido en una Espira con Corriente

Enfoque 1: Por Fuerza sobre Conductores Rectos

✦ Usamos:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad \text{y} \quad \tau = \vec{r} \times \vec{F}$$

💡 Segmentos activos (perpendiculares al campo):

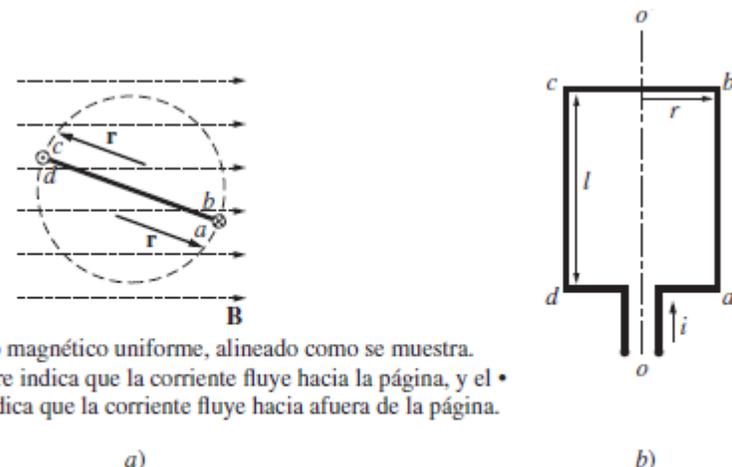
- Segmentos ab y cd aportan par.
- Segmentos bc y da no generan par (fuerza no tiene brazo de palanca).

📊 Para un segmento:

$$\tau_{ab} = rilB \sin(\theta), \quad \tau_{cd} = rilB \sin(\theta)$$

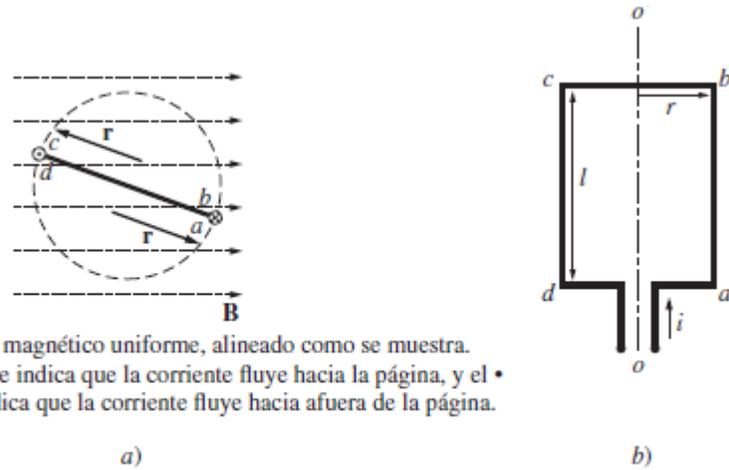
📦 Par total inducido:

$$\tau_{\text{ind}} = 2rilB \sin(\theta)$$



\mathbf{B} es un campo magnético uniforme, alineado como se muestra. La \times en el alambre indica que la corriente fluye hacia la página, y el \bullet en el alambre indica que la corriente fluye hacia afuera de la página.

FIGURA 3-4 Una espira con corriente en un campo magnético uniforme. a) Vista de frente; b) vista de la bobina.



B es un campo magnético uniforme, alineado como se muestra. La \times en el alambre indica que la corriente fluye hacia la página, y el \bullet en el alambre indica que la corriente fluye hacia afuera de la página.

FIGURA 3-4 Una espira con corriente en un campo magnético uniforme. a) Vista de frente; b) vista de la bobina.

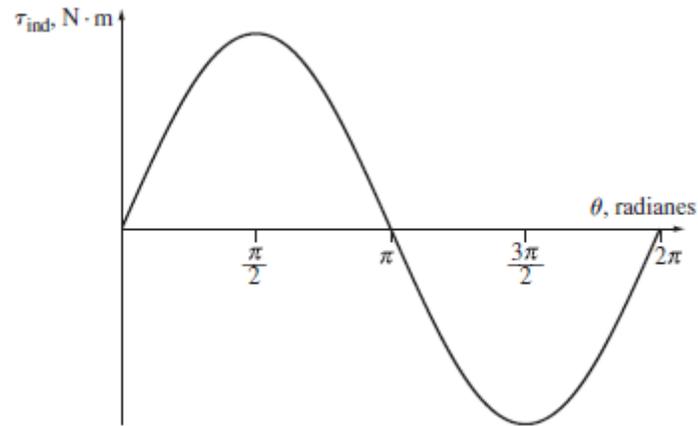


FIGURA 3-6 Gráfica de τ_{ind} y θ .

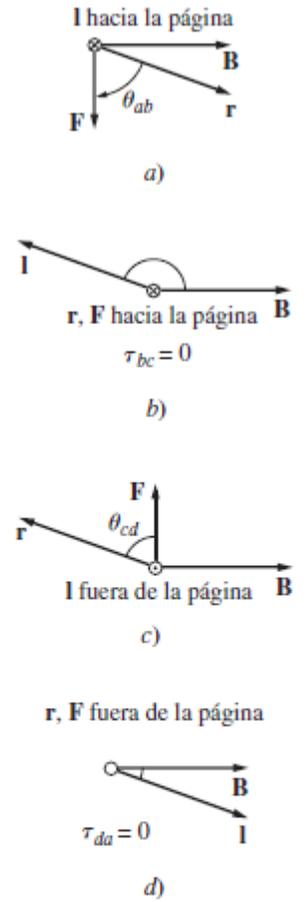


FIGURA 3-5 a) Obtención de la fuerza y par en el segmento ab . b) Obtención de la fuerza y par en el segmento bc . c) Obtención de la fuerza y par en el segmento cd . d) Obtención de la fuerza y par en el segmento da .

Enfoque 2: Interacción de Campos Magnéticos

🎯 El rotor genera un campo:

$$\vec{B}_{\text{esp}} = Gi$$

🔄 Interactúa con campo del estator \vec{B}_S :

$$\vec{\tau}_{\text{ind}} = k \vec{B}_{\text{esp}} \times \vec{B}_S$$

✅ Magnitud:

$$\tau_{\text{ind}} = k B_{\text{esp}} B_S \sin(\theta)$$

★ Con $k = AG$, depende de la geometría de la máquina.

✓ Magnitud:

$$\tau_{\text{ind}} = k B_{\text{esp}} B_S \sin(\theta)$$

✦ Con $k = AG$, depende de la geometría de la máquina.

✓ Conclusión

El **par inducido** en una máquina de CA real depende de:

1. Intensidad del campo magnético del rotor.
2. Intensidad del campo magnético del estator.
3. Seno del ángulo entre ambos campos.
4. Una constante geométrica que depende de la construcción.

Campo Magnético Giratorio

¿Qué es?

- Es un campo magnético que rota en el espacio.
 - Lo genera un sistema trifásico de corrientes alternas en el estator de una máquina de CA.
 - Su magnitud es constante, pero su dirección rota uniformemente.
-

¿Cómo se forma?

- El estator tiene tres bobinas ubicadas a 120° eléctricamente.
- Cada bobina recibe una corriente alterna desfasada 120° respecto a las otras.
- El resultado es que los campos magnéticos de cada fase se suman y crean un campo resultante que gira.

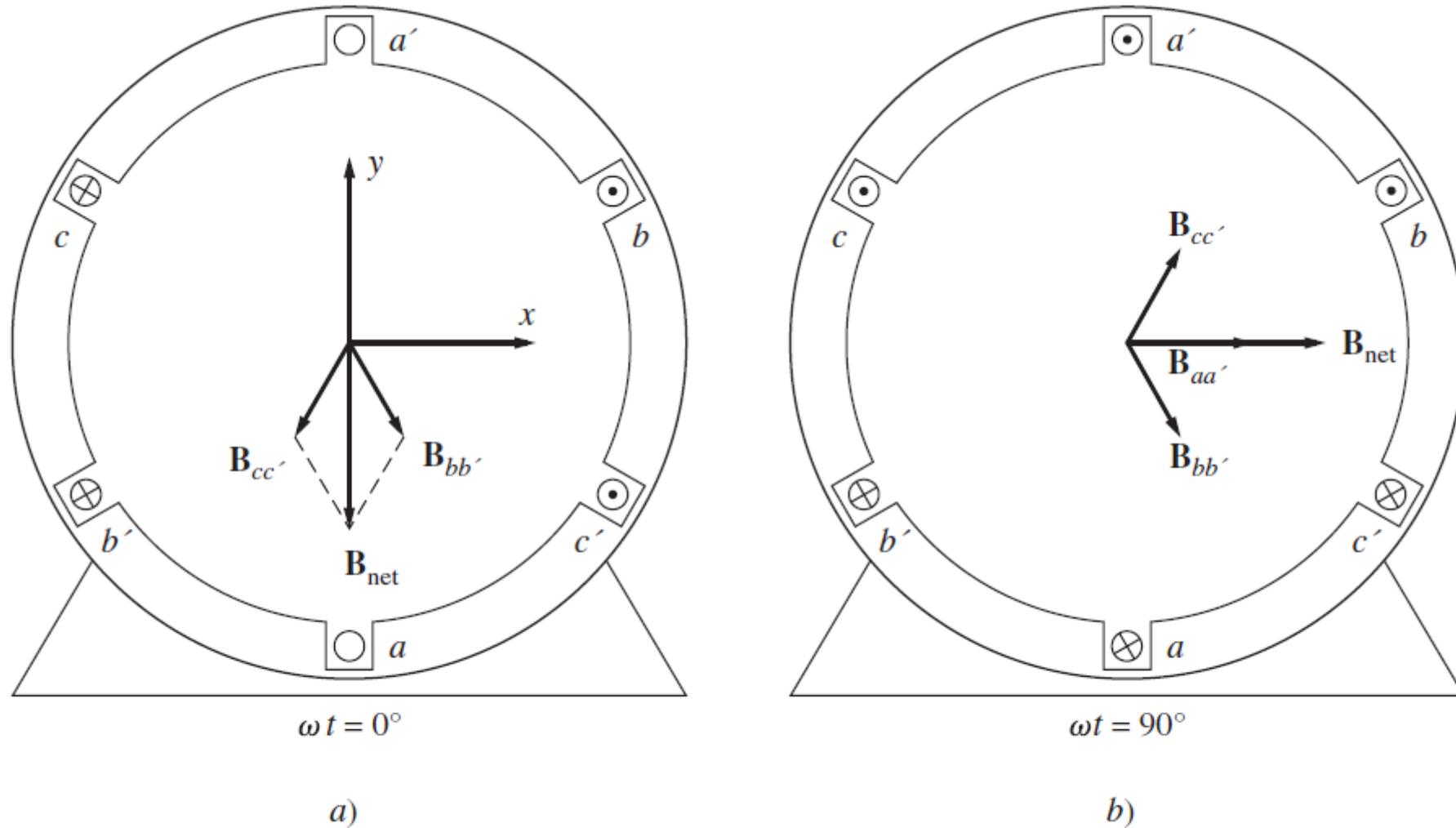


FIGURA 3-9 a) Vector de campo magnético de un estator en el tiempo $\omega t = 0^\circ$. b) Vector de campo magnético en el estator en el tiempo $\omega t = 90^\circ$.

⚙ Relación entre Frecuencia y Velocidad del Campo Magnético

👉 ¿Qué es el campo magnético giratorio?

- Al aplicar **corrientes trifásicas** a los devanados del estator, se produce un **campo magnético giratorio**.
- Este campo rota mecánicamente sobre la periferia del estator.
- La velocidad de esta rotación **depende del número de pares de polos** y de la **frecuencia eléctrica**.

▴ Caso básico: Un par de polos ($P = 1$)

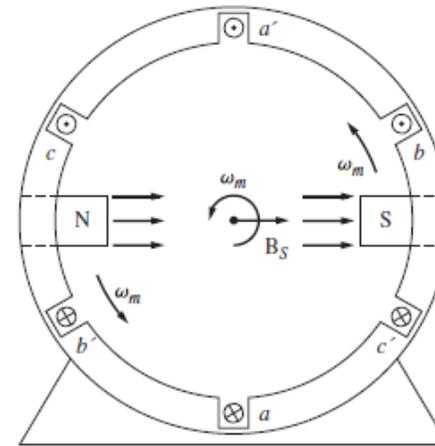


FIGURA 3-10 Campo magnético giratorio en un estator representado como polos de estator norte y sur en movimiento.

- Con un **par de polos**, el campo magnético da **una vuelta mecánica por cada ciclo eléctrico**:

$$f_e = f_m \quad \text{y} \quad \omega_e = \omega_m$$

+ Generalización: P pares de polos

- Con P pares de polos, el campo completa una vuelta mecánica cada P ciclos eléctricos:

$$f_e = P \cdot f_m \Rightarrow f_m = \frac{f_e}{P}$$

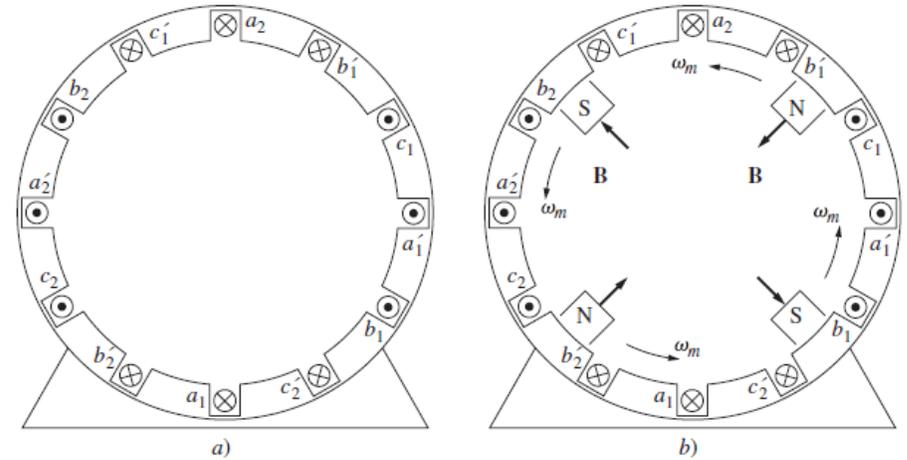
- O en términos de velocidad angular:

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{P}$$

🔄 Velocidad Síncrona en RPM

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{P}$$

- n_s : velocidad síncrona en revoluciones por minuto (rpm)
- f_e : frecuencia eléctrica (Hz)
- P : número de pares de polos



1. Torque en una Espira Elemental 🧩

- **Interacción entre corriente y campo magnético:** La corriente en una espira, ubicada en un campo magnético, genera una **fuerza de Lorentz** sobre ella.
 - Este efecto produce un **par de fuerzas** que genera un **torque** sobre la espira. ⚙️
 - **Magnitud del torque:** Depende de la **corriente**, la **longitud de la espira** y la **densidad del flujo magnético**.
-

2. FEM Inducida en una Espira ⚡

- **Ley de Faraday:** Un campo magnético variable induce una **fem** en la espira.
- La **fem** es proporcional a la velocidad de **corte de las líneas de flujo magnético** y la orientación de la espira con respecto al campo. 🌀
- La dirección de la **fem** sigue la **ley de Lenz** para oponerse al cambio en el flujo magnético.

3. Campo Magnético Giratorio

- Un **devanado trifásico** con corrientes desfasadas 120° genera un **campo magnético giratorio** en el estator.
- Este campo tiene **magnitud constante** y gira en la dirección determinada por el desfase de las corrientes.
- El **campo magnético giratorio** induce un torque en el rotor, haciendo que gire y persiga este campo.



4. Relación entre Frecuencia Eléctrica y Velocidad de Rotación

- La **frecuencia eléctrica** (f_e) está relacionada con la **velocidad del campo magnético giratorio** (f_m).
- Cuantos más **polos magnéticos** haya en el estator, **más lento gira** el campo magnético en comparación con la frecuencia eléctrica.
- La relación general entre **f_e** y **f_m** está determinada por el número de polos del estator.

5. Inversión de la Dirección de Rotación 🔄 ➡

- Al intercambiar las fases del estator, cambiamos de una **secuencia directa** a una **secuencia indirecta**, lo que **invierte el sentido de rotación** del campo magnético.
 - Esto provoca que el rotor gire en sentido opuesto al anterior. 🔄
-

¡Lo aprendido!

- La **fem inducida** y el **torque** en una espira interactúan con el campo magnético para generar movimiento.
- El **campo magnético giratorio** es clave para el funcionamiento de los motores de CA.
- La **frecuencia eléctrica** y el **número de polos** determinan la velocidad de rotación del campo magnético.
- **Invertir el sentido de giro** es tan sencillo como conmutar las fases del estator. 🔄 ⚡

Clase 17

Parte 2

Fundamentos de máquinas de CA (2da parte)

21 de mayo de 2025

- ◆ 3.3 Fuerza magnetomotriz y distribución de flujo en máquinas de CA
- ◆ 3.4 Voltaje inducido en máquinas de CA
 - ⚙ En una bobina de estator bipolar
 - ⚙ En un grupo de bobinas trifásico
 - ⚙ Valor RMS en un estator trifásico
- ◆ 3.5 Par inducido en una máquina de CA
- ◆ 3.6 Aislamiento del devanado
- ◆ 3.7 Flujo de potencia y pérdidas
 - 🔌 Tipos de pérdidas
 - 📈 Diagrama de flujo de potencia
- ◆ 3.8 Regulación de voltaje y velocidad

3.3 Fuerza magnetomotriz y distribución de flujo en máquinas de CA

¿Qué cambia en una máquina real?

 Hasta ahora:

- Suponíamos que el flujo salía perpendicular al plano de la bobina (espacio libre).
- Aplicábamos la regla de la mano derecha para la dirección de B .

 Pero en una máquina real:

- Hay un **rotor ferromagnético** en el centro.
- Existe un **entrehierro** entre el rotor y el estator.

 Consecuencia:

- El flujo **no sigue trayectorias rectas**: el campo busca el **camino de menor reluctancia**.

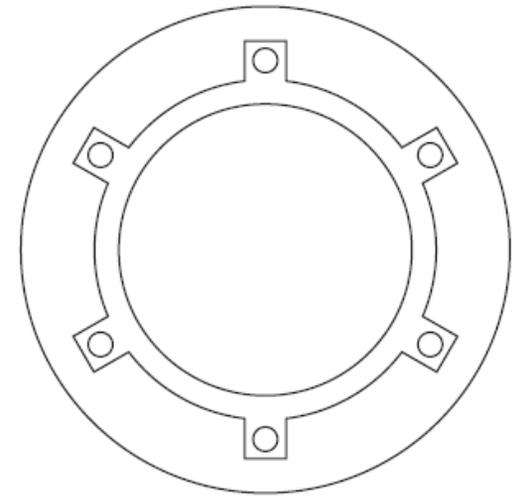
🌀 Tipos de rotores en máquinas de CA

📷 Dos configuraciones comunes:

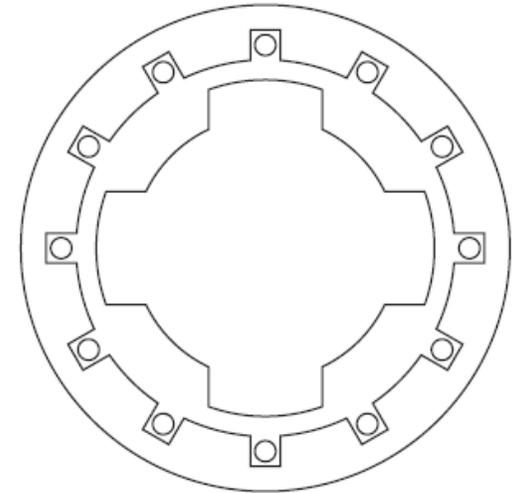
1. **Rotor cilíndrico** (● polos no salientes)
→ Más simple de modelar → Es el que estudiaremos.
2. **Rotor con polos salientes** (● salientes)
→ Más complejo → Se discute brevemente en el apéndice C.

💡 Clave conceptual:

El flujo salta **perpendicularmente** entre estator y rotor, porque el entrehierro tiene **mayor reluctancia** que el resto del circuito magnético.



a)



b)

FIGURA 3-12 a) Máquina de ca con rotor cilíndrico o de polos no salientes. b) Máquina de ca con rotor de polos salientes.

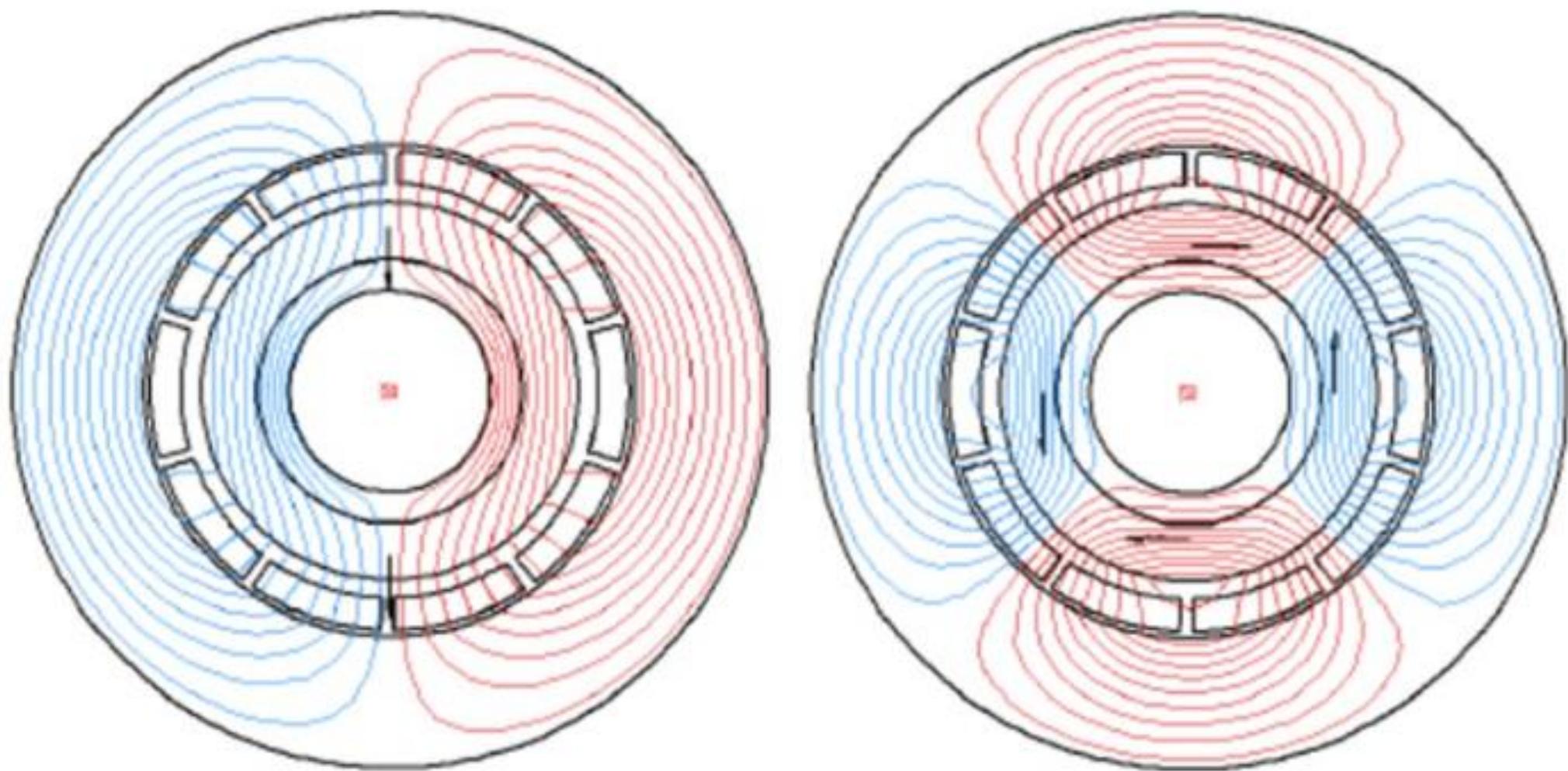
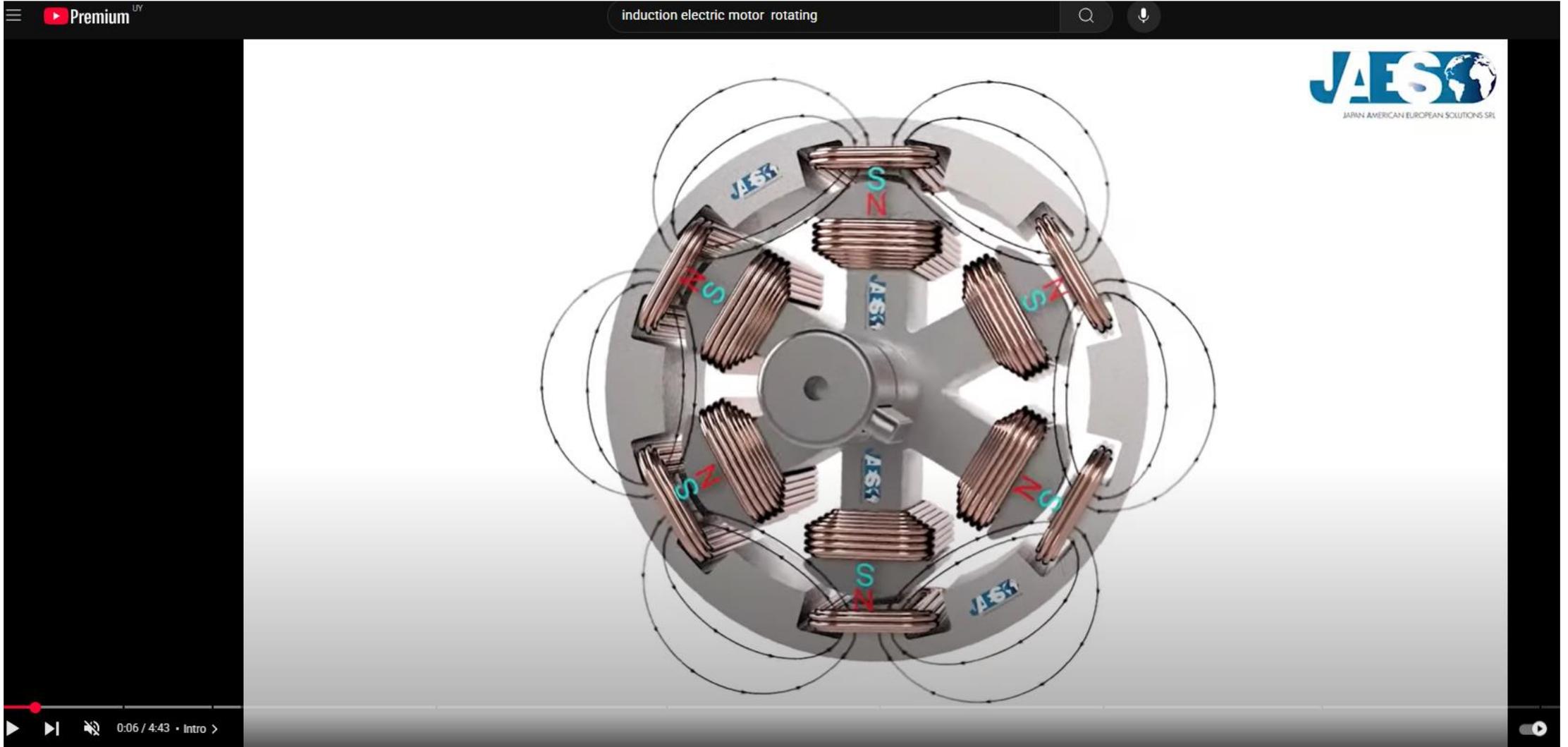


Figure 2: Flux lines for two- and four-pole rotor magnet



What is a SYNCHRONOUS MOTOR and how does it work? - Rotating magnetic field - Synchronism speed

<https://www.youtube.com/watch?v=Tk3lNBSAgEg>

¿Cómo obtener una densidad de flujo senoidal?

Para que la máquina genere una **fem senoidal**, se necesita:

 Un campo magnético **senoidal** en el entrehierro



 Una **fuerza magnetomotriz senoidal**



 Una **distribución específica** de los conductores

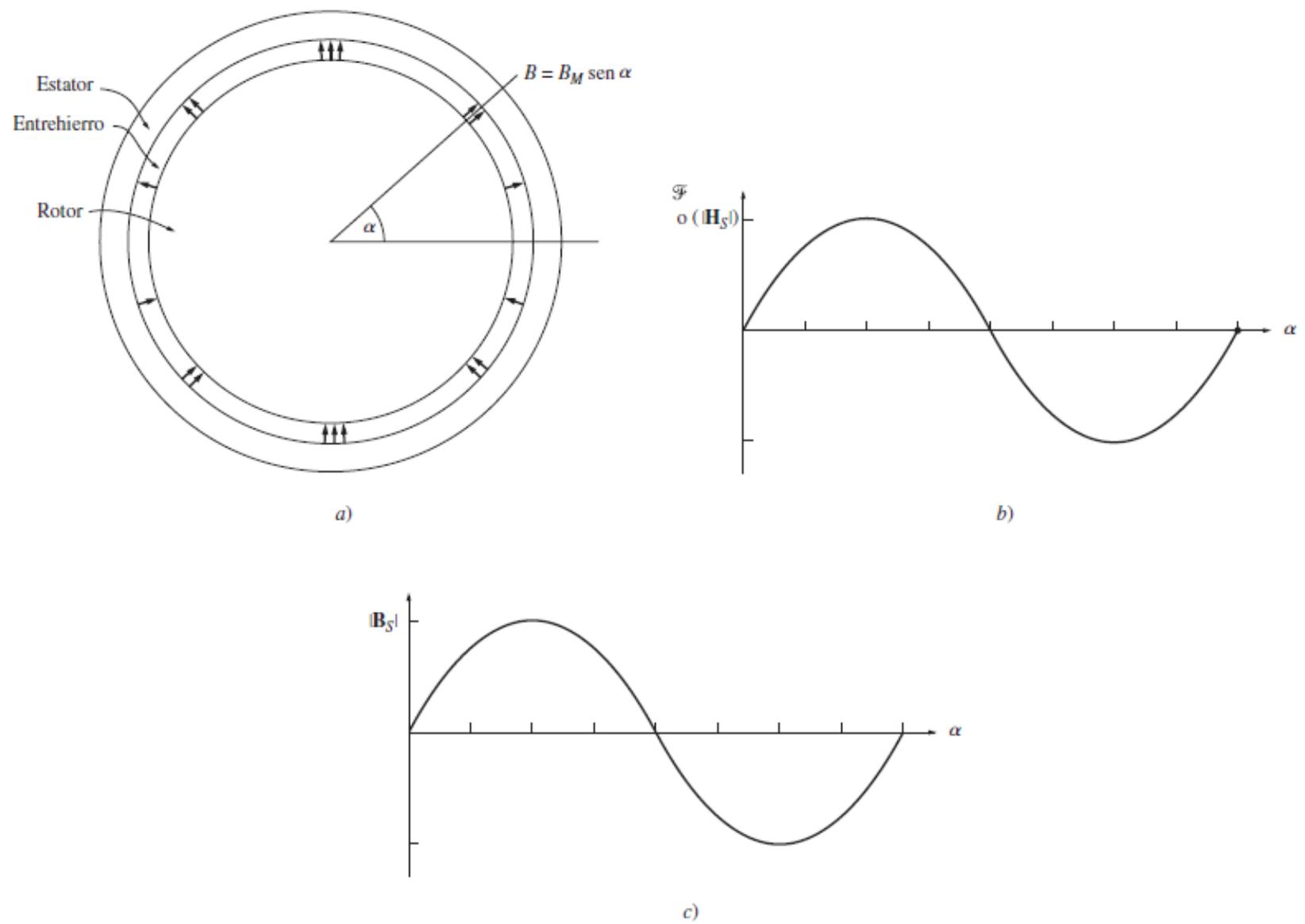


FIGURA 3-13 a) Rotor cilíndrico con densidad de flujo del entrehierro que varía senoidalmente. b) Fuerza magnetomotriz o intensidad de campo magnético como función del ángulo α en el entrehierro. c) Densidad de flujo como función del ángulo α en el entrehierro.

Distribución de conductores

 Distribuir conductores siguiendo:

$$n_a = N_a \cdot \cos(\alpha)$$

 Resultado:

- Produce una **FM senoidal** a lo largo del entrehierro.
- Cuantas más ranuras y más cercanas estén  mejor la aproximación.

 En la práctica:

- Solo se pueden usar números enteros de conductores.
- Se generan **armónicas** no deseadas.

 Solución:

- Se usan **devanados de paso fraccionado** para suprimir armónicas (Ap. B.1).

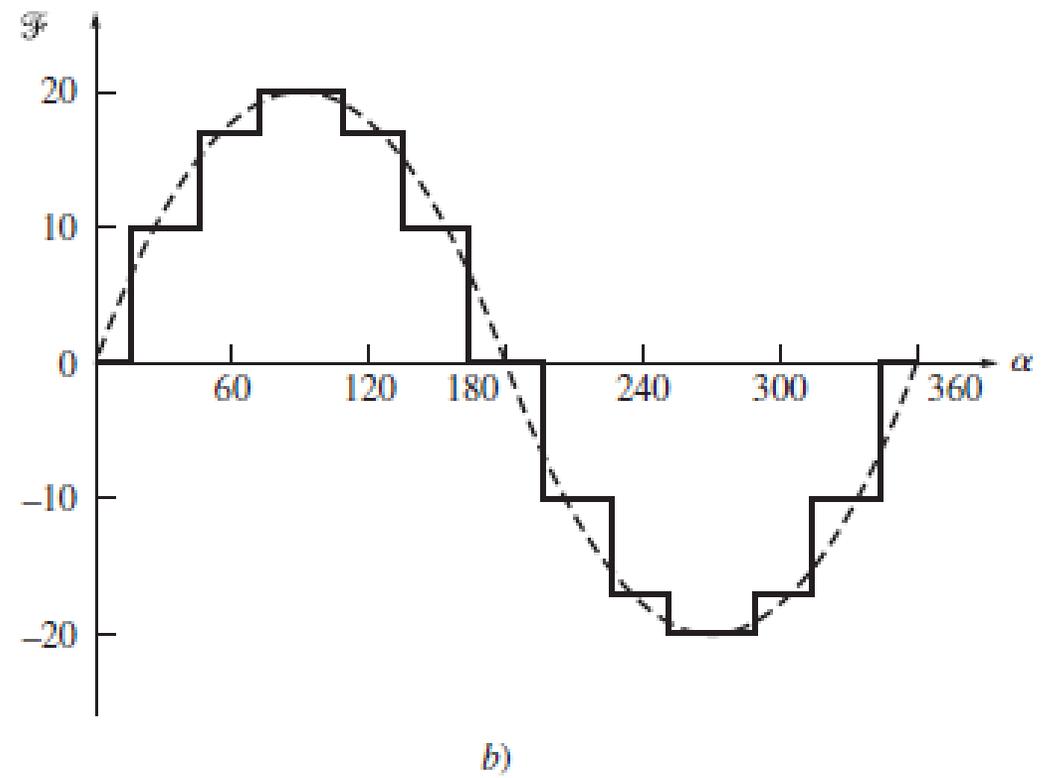
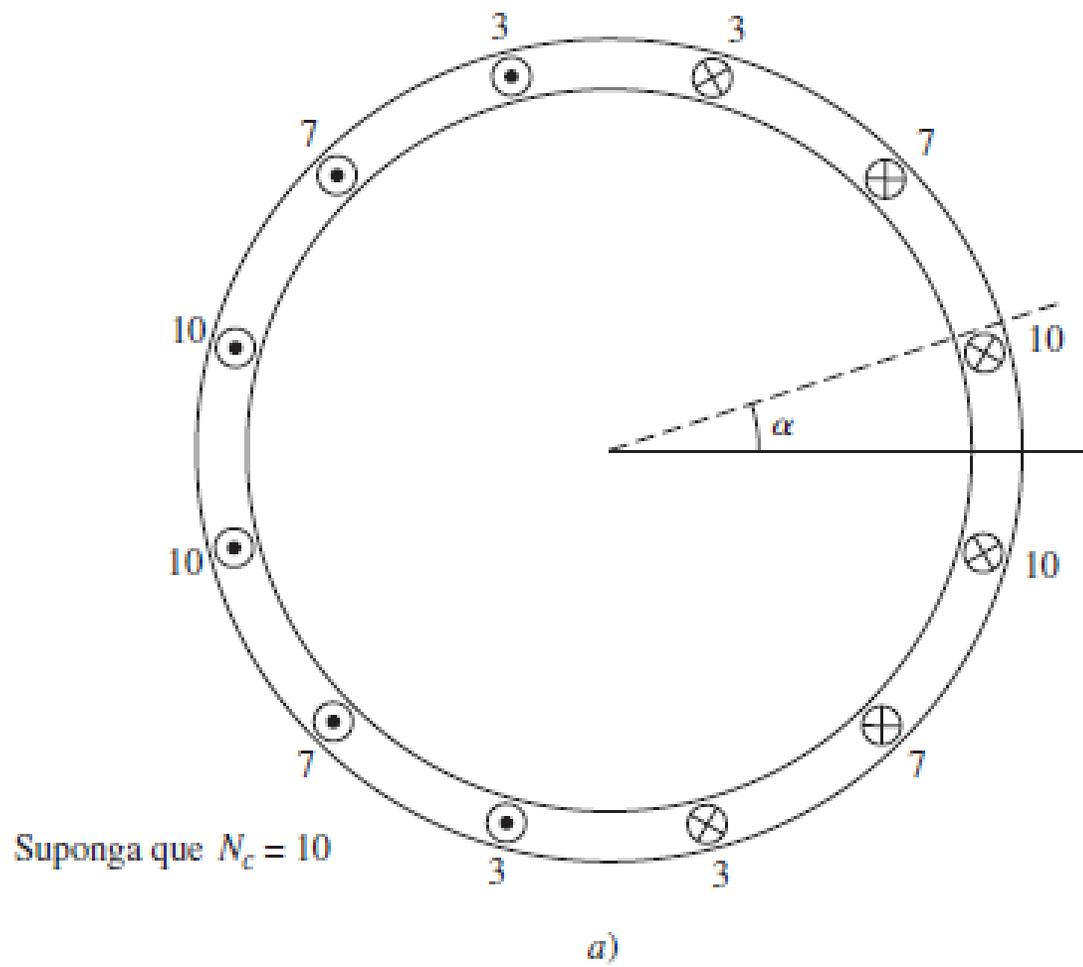


FIGURA 3-14 a) Máquina de ca con el devanado del estator distribuido, el cual ha sido diseñado para producir una densidad de flujo del entrehierro que varíe senoidalmente. El número de conductores en cada ranura se indica en el diagrama. b) Distribución de fuerza magnetomotriz resultante del devanado, comparada con una distribución ideal.

Resumen

- ✓ El flujo **tiende a alinearse** con el camino de menor reluctancia.
- ✓ Para obtener un campo magnético senoidal, se debe distribuir el bobinado siguiendo una ley cosenoidal.
- ✓ A mayor número de ranuras  mejor aproximación a una FM senoidal.
- ✓ En la práctica hay limitaciones, pero se aplican técnicas de diseño para suprimir armónicas.

⚡ Voltaje inducido en máquinas de corriente alterna

📖 Sección 3.4 – Chapman

🔄 Campo giratorio → Voltaje inducido

🧠 Así como **corrientes trifásicas** en el estator crean un **campo magnético giratorio**...

➔ Un **campo magnético giratorio** también puede inducir **voltajes trifásicos** en un estator fijo.

👉 Vamos paso a paso:

1. Primero analizamos una sola **bobina de una vuelta**
2. Luego generalizamos a un **sistema trifásico completo**

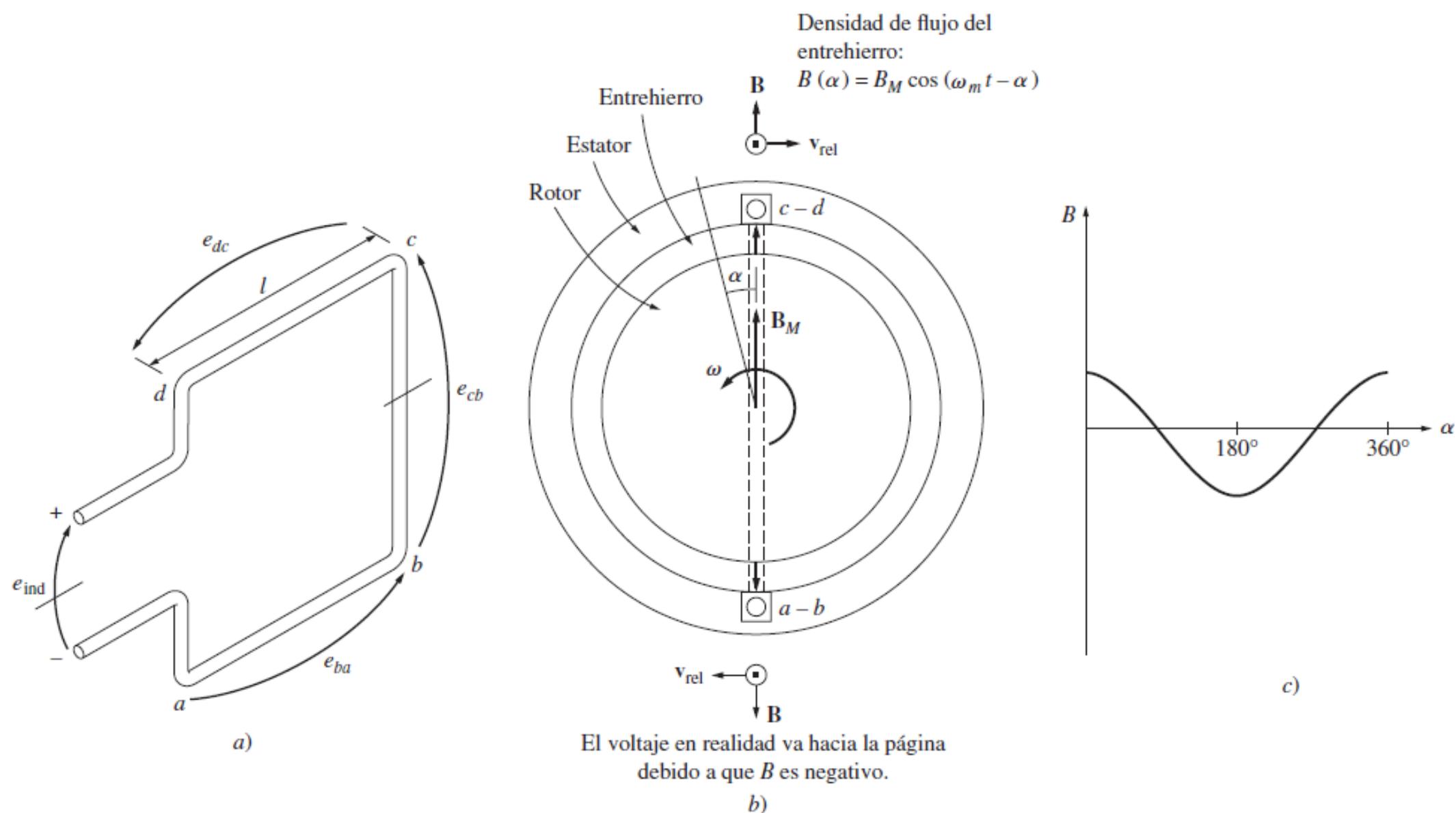


FIGURA 3-15 *a)* Campo magnético de rotor giratorio dentro de una bobina de estator estacionaria. Detalle de la bobina. *b)* El vector de densidades de flujo magnético y velocidades en los lados de la bobina. Las velocidades que se muestran tienen un marco de referencia en el que el campo magnético es estacionario. *c)* La distribución de densidad de flujo en el entrehierro.

Bobina en un estator con campo giratorio

✦ Supongamos un rotor con un **campo magnético senoidal** que gira dentro de una bobina fija:

$$B = B_M \cos(\theta)$$

🌀 Si el rotor gira con velocidad angular ω_m , entonces:

$$B = B_M \cos(\omega_m t - \alpha)$$

🗨 Esto representa cómo **varía el campo en el espacio y en el tiempo**.

¿Cómo se induce un voltaje?

Recordamos la ecuación:

$$e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$$

⚠ Pero aquí el **campo se mueve** y el conductor está **quieto**...

✅ Solución: cambiamos a un marco en que el campo parezca estacionario

➡ Así, los conductores parecen moverse con una velocidad **relativa** \vec{v}_{rel}

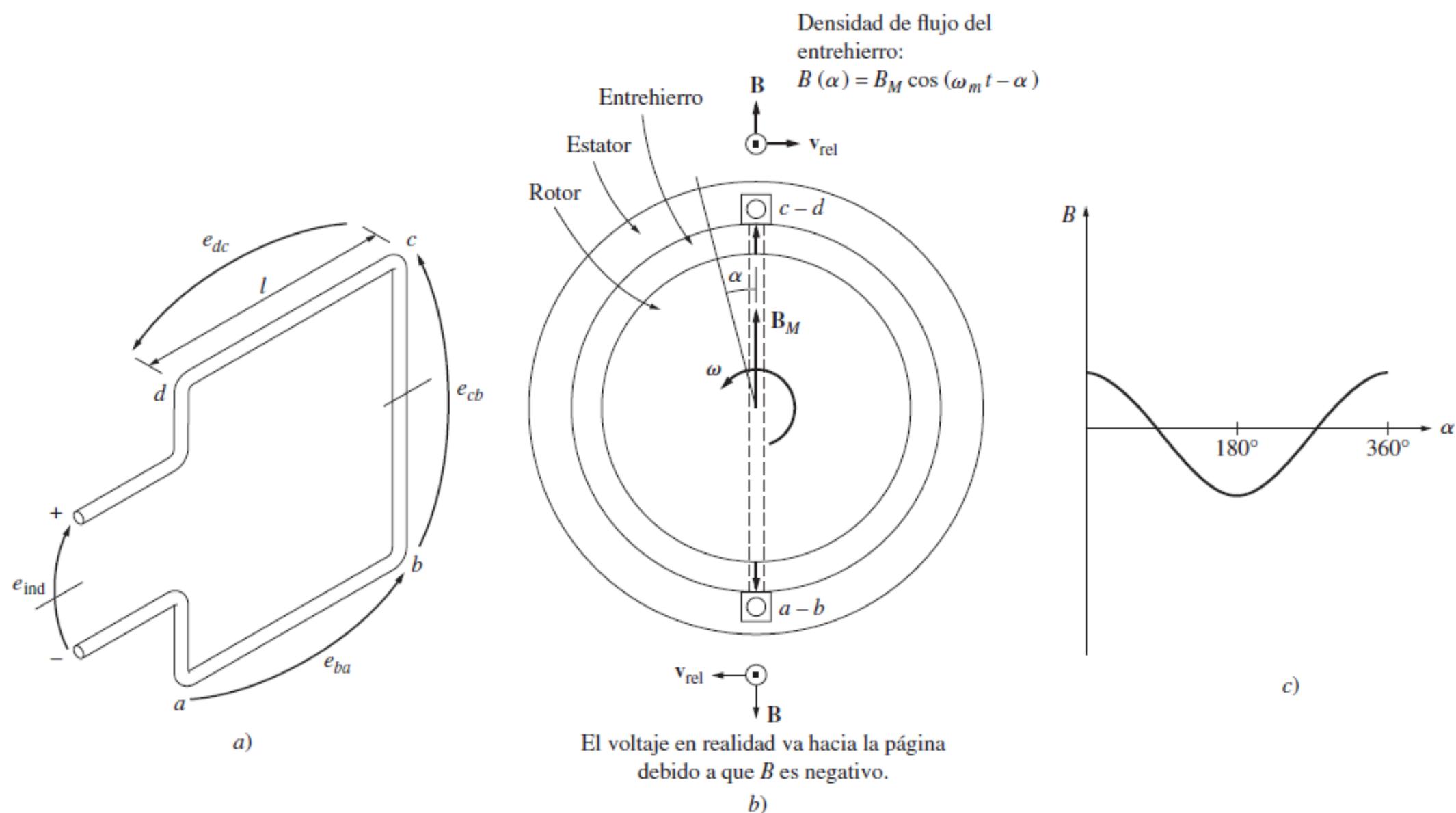


FIGURA 3-15 a) Campo magnético de rotor giratorio dentro de una bobina de estator estacionaria. Detalle de la bobina. b) El vector de densidades de flujo magnético y velocidades en los lados de la bobina. Las velocidades que se muestran tienen un marco de referencia en el que el campo magnético es estacionario. c) La distribución de densidad de flujo en el entrehierro.

📺 ¿Cómo se induce un voltaje?

Recordamos la ecuación:

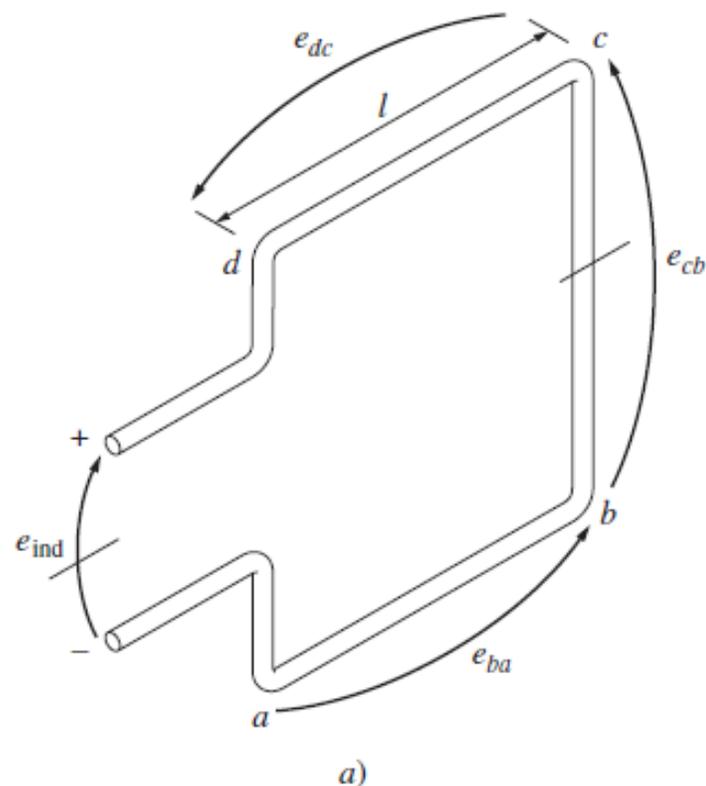
$$e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$$

- ⚠️ Pero aquí el **campo se mueve** y el conductor está **quieto**...
- ✅ Solución: cambiamos a un marco en que el campo parezca estacionario
- ➡️ Así, los conductores parecen moverse con una velocidad **relativa** \vec{v}_{rel}

🧰 Análisis por segmentos de la bobina

✂️ Dividimos la bobina en 4 segmentos (ver Fig. 3-15):

- **ab y cd**: lados activos → generan voltaje
- **bc y da**: lados cortos → **no generan voltaje**



Segmento ab

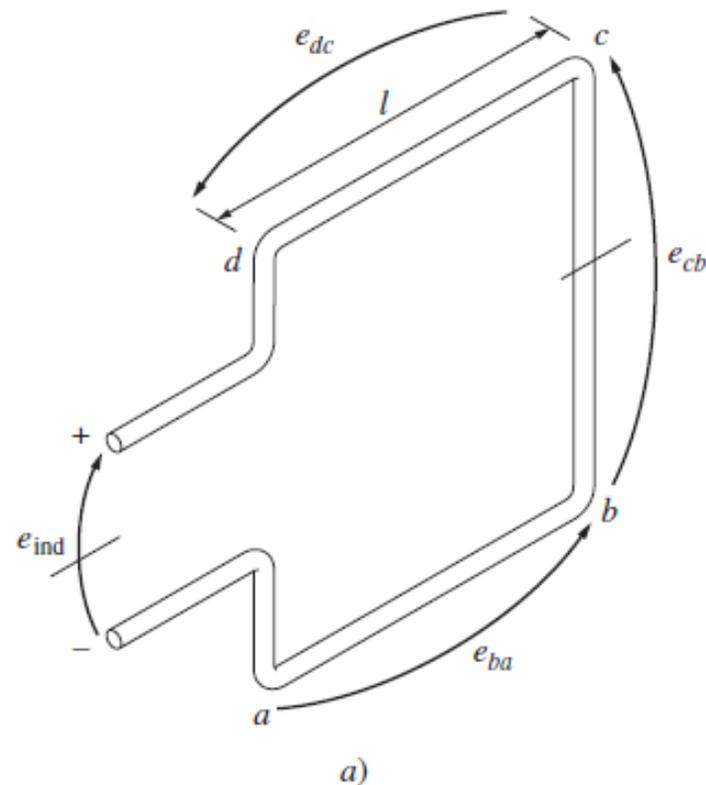
- Ángulo $\alpha = 180^\circ$
- $\vec{v} \perp \vec{B}$, producto cruzado es máximo
- Dirección opuesta a $\vec{l} \rightarrow$ signo negativo

$$e_{ab} = -vB_M l \cos(\omega_m t - 180^\circ)$$

Segmento cd

- Ángulo $\alpha = 0^\circ$
- Mismo razonamiento, pero ahora con signo positivo:

$$e_{cd} = +vB_M l \cos(\omega_m t)$$



+ Suma de voltajes en la bobina

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

$$e_{ind} = 2vB_M l \cos(\omega_m t)$$

Si $v = r\omega_m$:

$$e_{ind} = 2r\omega_m B_M l \cos(\omega_m t)$$

¡Es un voltaje sinusoidal!

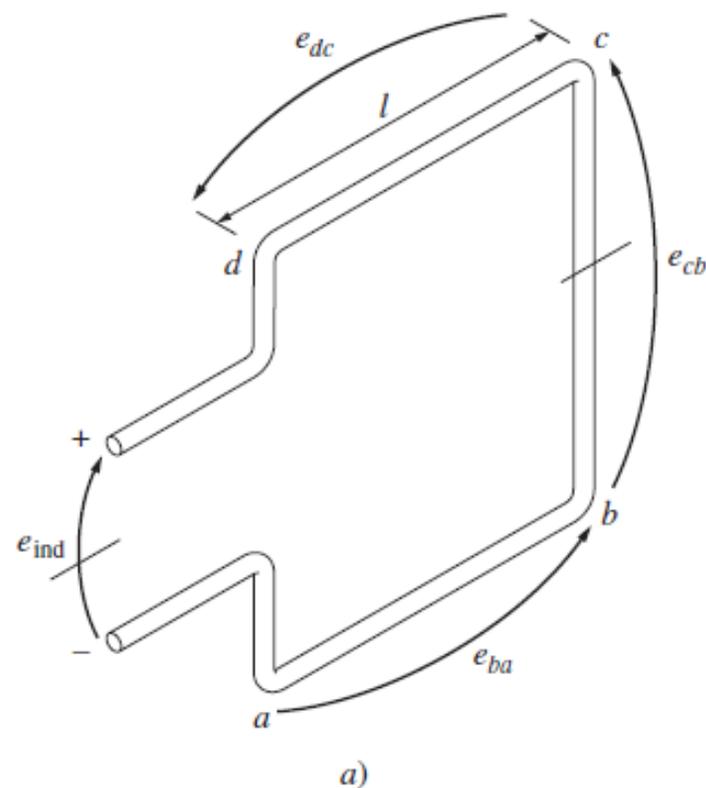
Relación con el flujo magnético

Supongamos:

$$\phi = 2rlB_M$$

Entonces:

$$e_{ind} = \phi \cdot \omega_m \cos(\omega_m t)$$



Si la bobina tiene muchas vueltas...

Si tiene N_C vueltas:

$$e_{ind} = N_C \phi \omega_m \cos(\omega_m t)$$

 Igual que en la **espira giratoria** del capítulo 3.1, pero ahora con el **campo girando**.

¿Coseno o seno?

 El uso de $\cos(\omega t)$ en lugar de $\sin(\omega t)$ es **una convención**.

 Si cambiamos el **punto de referencia angular**, aparece el seno:

$$\cos(\omega t) = \sin(\omega t + 90^\circ)$$

 **No tiene implicancia física**, solo cambia la fase.

🔄 Ahora pasamos al caso trifásico

■ Si colocamos 3 bobinas desplazadas 120° :

- Se inducen 3 voltajes sinusoidales desfasados 120° entre sí:

$$e_{aa}(t) = N_C \phi \omega \sin(\omega t)$$

$$e_{bb}(t) = N_C \phi \omega \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{cc}(t) = N_C \phi \omega \sin(\omega t - 240^\circ)$$

⚡ Producción de voltaje trifásico

🌀 Un campo giratorio:

- Puede ser **generado por** corrientes trifásicas
- Puede **inducir voltajes trifásicos** en un estator

➡ ¡Simetría hermosa! ✨

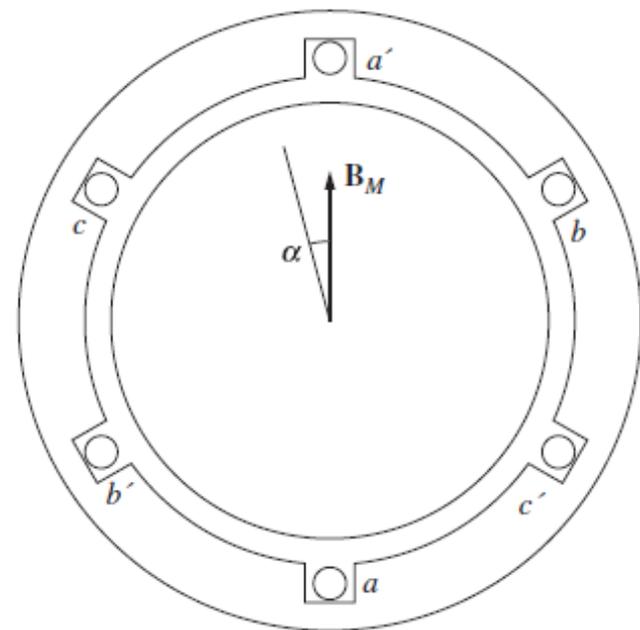


FIGURA 3-16 Producción de voltajes trifásicos con tres bobinas separadas por 120° .

12 34 Voltaje pico y RMS

✓ Voltaje máximo por fase:

$$E_{max} = N_C \phi \omega = 2\pi N_C \phi f$$

✓ Voltaje RMS por fase:

$$E_A = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi N_C \phi f$$

🔌 Conexión en Y o en Δ

◆ Conexión en Y:

$$\text{Voltaje terminal} = \sqrt{3}E_A$$

▲ Conexión en Δ :

$$\text{Voltaje terminal} = E_A$$

Clase 18

**Repaso de clase pasada
Fundamentos de máquinas de AC (3ra parte)**

26 de mayo de 2025

Par inducido en una máquina de corriente alterna

 Sección 3.5 – Chapman

¿Qué genera el par en una máquina de CA?

- En condiciones normales, hay **dos campos magnéticos**:
 -  Uno creado por el **estator**
 -  Otro creado por el **rotor**
- Estos campos **interactúan entre sí**, igual que dos imanes que intentan alinearse.
- Esa interacción crea un **par electromagnético**  que hace girar el rotor.

🔍 Caso simplificado: espira en un campo senoidal

■ Supongamos una espira rotatoria en un campo del estator que varía como:

$$B_S(\alpha) = B_S \sin \alpha$$

🌱 Analizamos la fuerza sobre cada conductor de la espira:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B})$$

🔧 Resultado:

$$\tau_{\text{ind}} = 2rilB_S \sin \alpha$$

🌀 ¡Un par que tiende a alinear la espira con el campo!

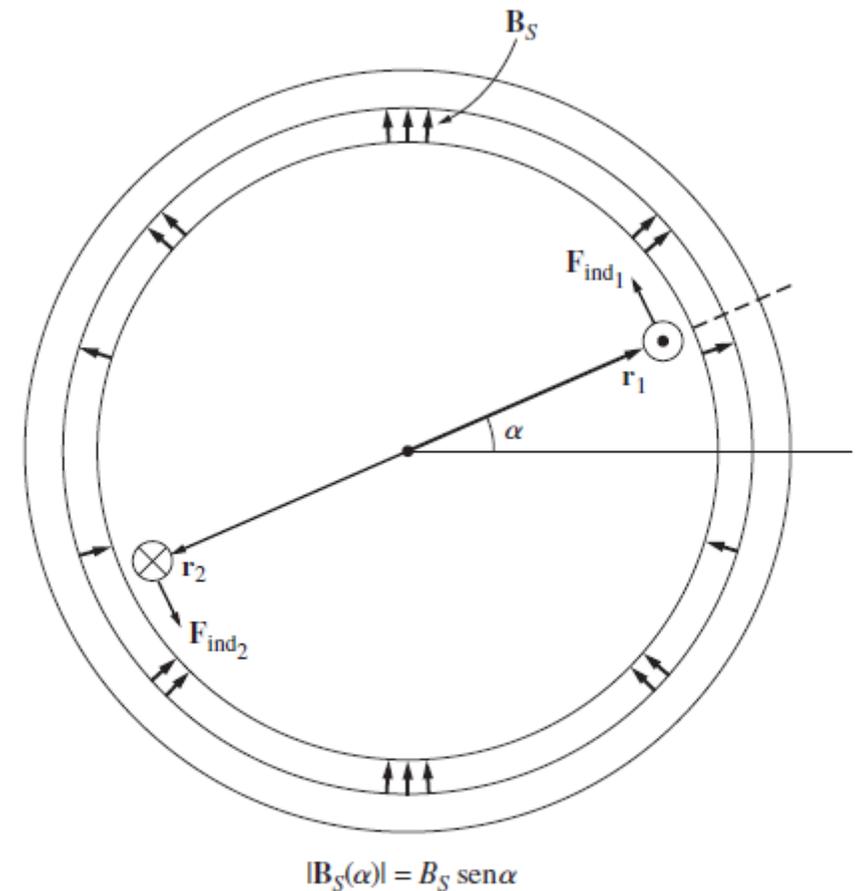


FIGURA 3-17 Máquina de ca simplificada con una distribución de flujo del estator senoidal y una sola bobina de alambre montada en el rotor.

🤔 ¿Y el rotor? También tiene su campo...

🔄 La corriente que circula por el rotor también genera un **campo magnético**:

$$H_R = Ci$$

👉 Su dirección se determina con la **regla de la mano derecha** 🖐️

📐 El ángulo entre los campos del rotor y del estator es:

$$\gamma = 180^\circ - \alpha \Rightarrow \sin \gamma = \sin \alpha$$

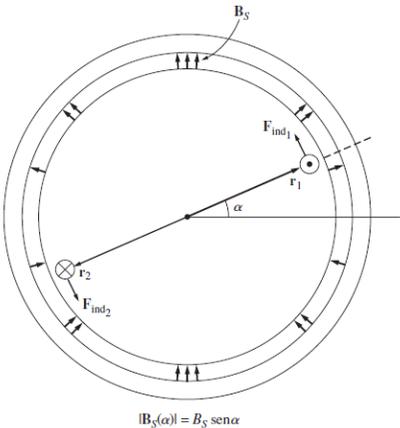


FIGURA 3-17 Máquina de ca simplificada con una distribución de flujo del estator senoidal y una sola bobina de alambre montada en el rotor.

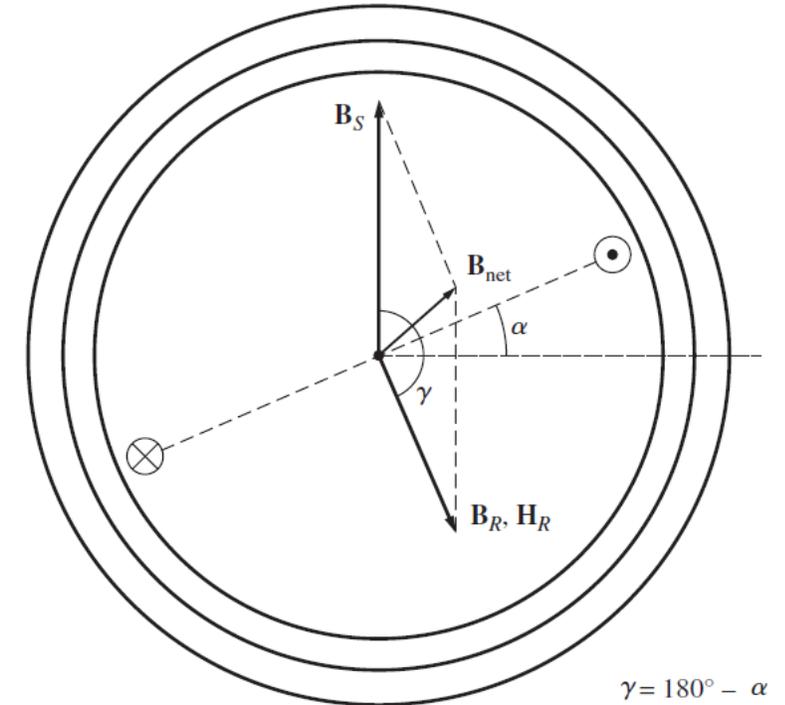


FIGURA 3-18 Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina de la figura 3-17.

⚙️ Par inducido con campo del rotor

📅 Reescribimos el par en función de los campos:

$$\tau_{\text{ind}} = K H_R B_S \sin \alpha$$

🕒 O en forma vectorial:

$$\vec{\tau}_{\text{ind}} = K(\vec{H}_R \times \vec{B}_S)$$

✏️ Esta fórmula muestra claramente la dirección del par (regla de la mano derecha).

💡 ¿Y si usamos directamente \vec{B}_R ?

✳️ Sabemos que:

$$\vec{B}_R = \mu \vec{H}_R$$

Entonces:

$$\vec{\tau}_{\text{ind}} = k(\vec{B}_R \times \vec{B}_S)$$

📅 k depende de la máquina y no es constante si hay saturación magnética 📈

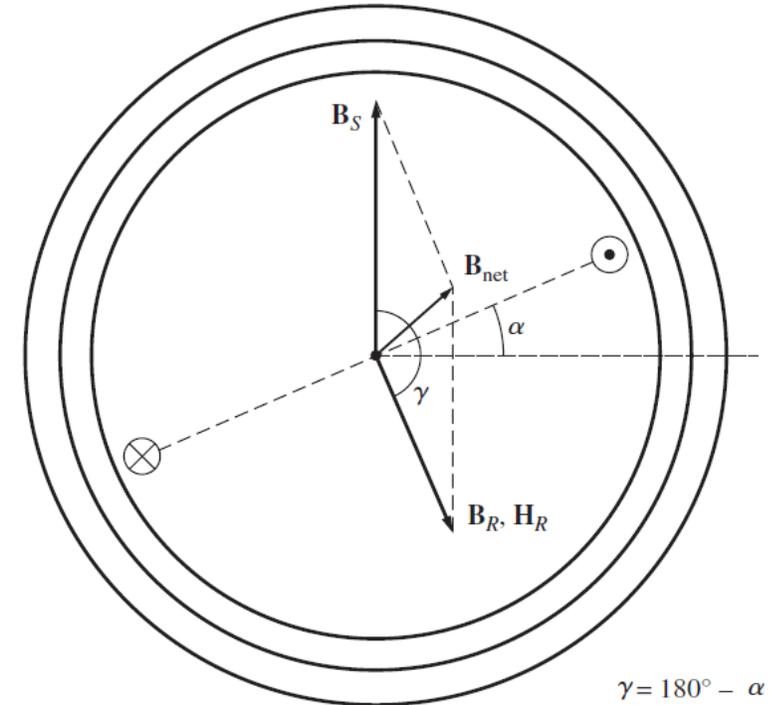


FIGURA 3-18 Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina de la figura 3-17.

- ¿Cuál es la dirección del par sobre el eje del rotor de la máquina?
- ¿La máquina está actuando como motor o como generador?

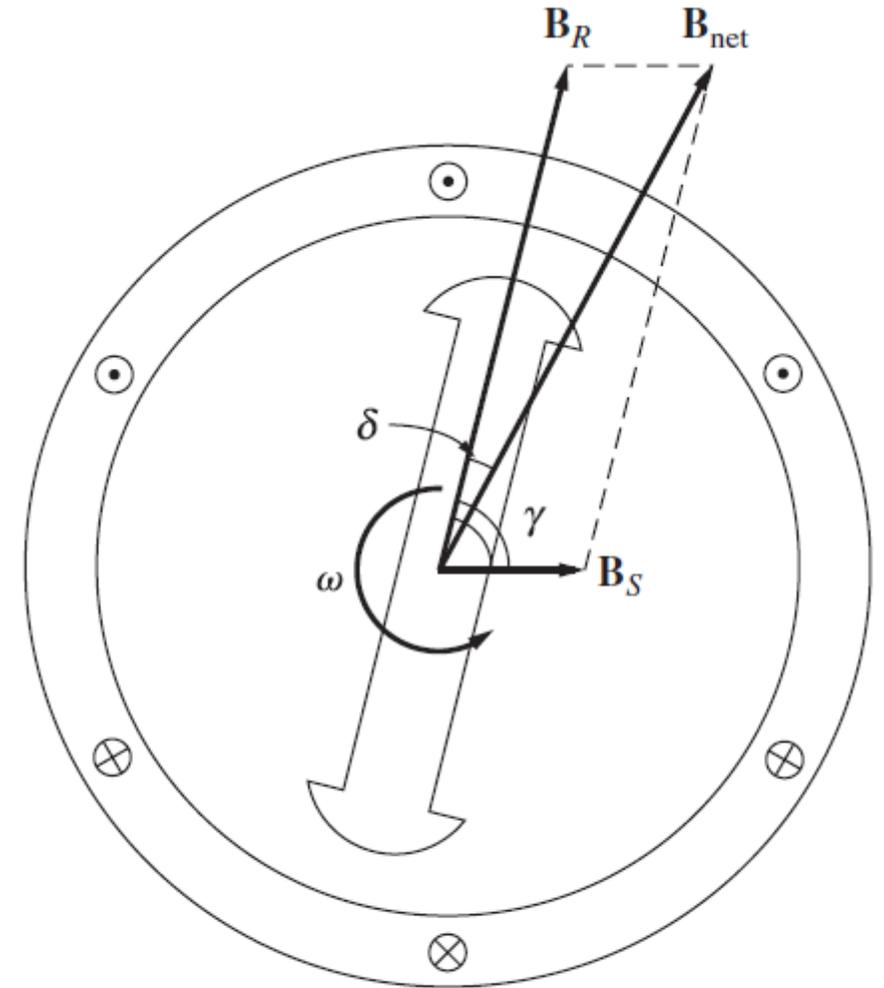


FIGURA 3-19 Máquina síncrona simplificada que muestra los campos magnéticos de su rotor y de su estator.

3.6: Aislamiento del devanado

Idea clave: el aislamiento es lo que permite que los devanados funcionen sin cortocircuitarse. Si falla, la máquina puede quedar inutilizable.

Puntos clave a destacar:

- El **aislamiento térmico** limita la **potencia continua** que puede entregar la máquina: más corriente = más calor.
- La **vida útil** del aislamiento cae a la mitad por cada 10 °C extra, aproximación conocida como la "regla del 10%".
- Clases térmicas comunes (NEMA):
 - **Clase B:** hasta 80 °C
 - **Clase F:** hasta 105 °C
 - **Clase H:** hasta 125 °C
- Este límite térmico está **normalizado** por NEMA e IEC.

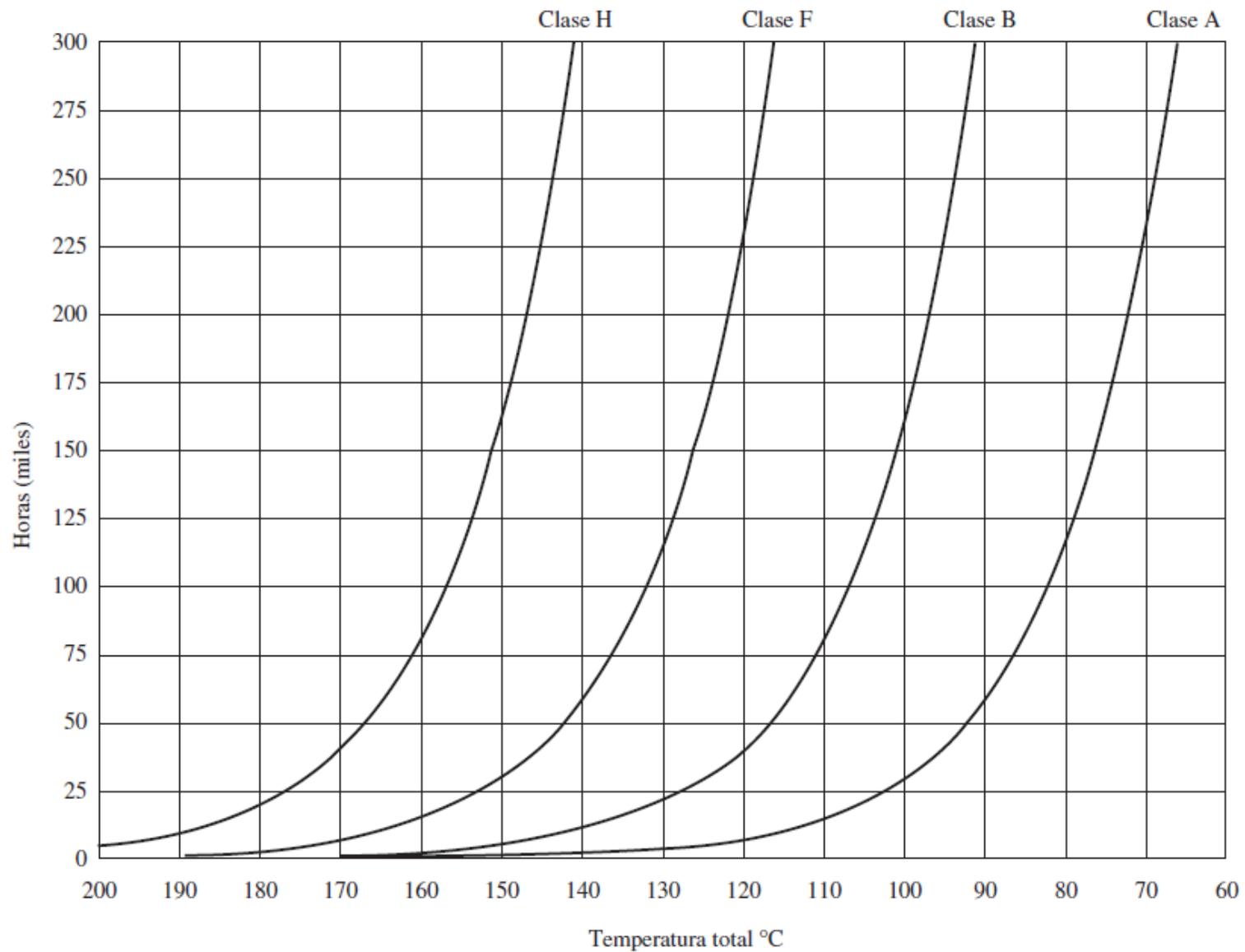


FIGURA 3-20 Gráfica de la vida promedio del aislamiento contra la temperatura del devanado de varias clases de aislamiento. (Cortesía de Marathon Electric Company.)

3.7 – Flujo de potencia y pérdidas en máquinas de CA

Las máquinas de CA transforman energía:

- **Generadores:** potencia mecánica → potencia eléctrica
- **Motores:** potencia eléctrica → potencia mecánica

⚠ En ambos casos hay **pérdidas**, por lo que la **potencia útil siempre es menor que la de entrada**.

Eficiencia de una máquina

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{entr}}} \times 100\% \quad (3-62)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\text{pérd}}}{P_{\text{entr}}} \right) \times 100\% \quad (3-63)$$

🔍 La eficiencia mide **qué parte de la potencia de entrada se transforma en salida útil**.

Diagrama de flujo de potencia – Generador de CA

Entrada: Potencia mecánica

Salida: Potencia eléctrica útil

Pérdidas: en el núcleo, mecánicas, dispersas y eléctricas

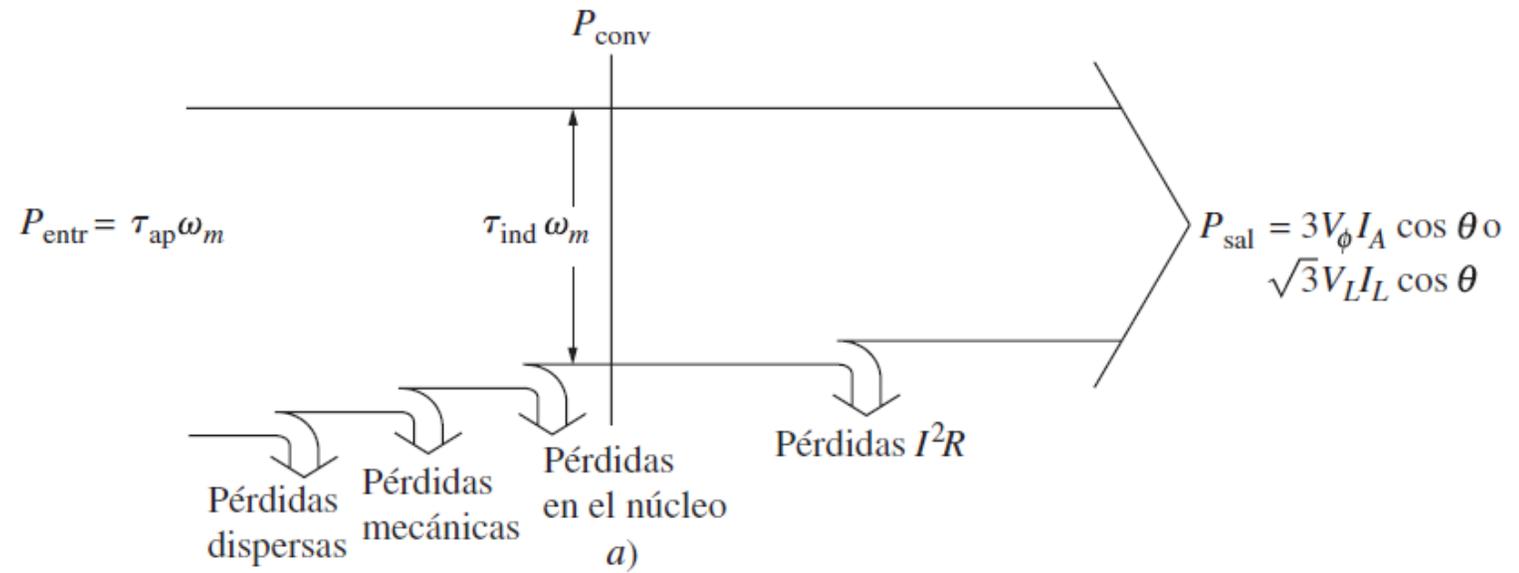
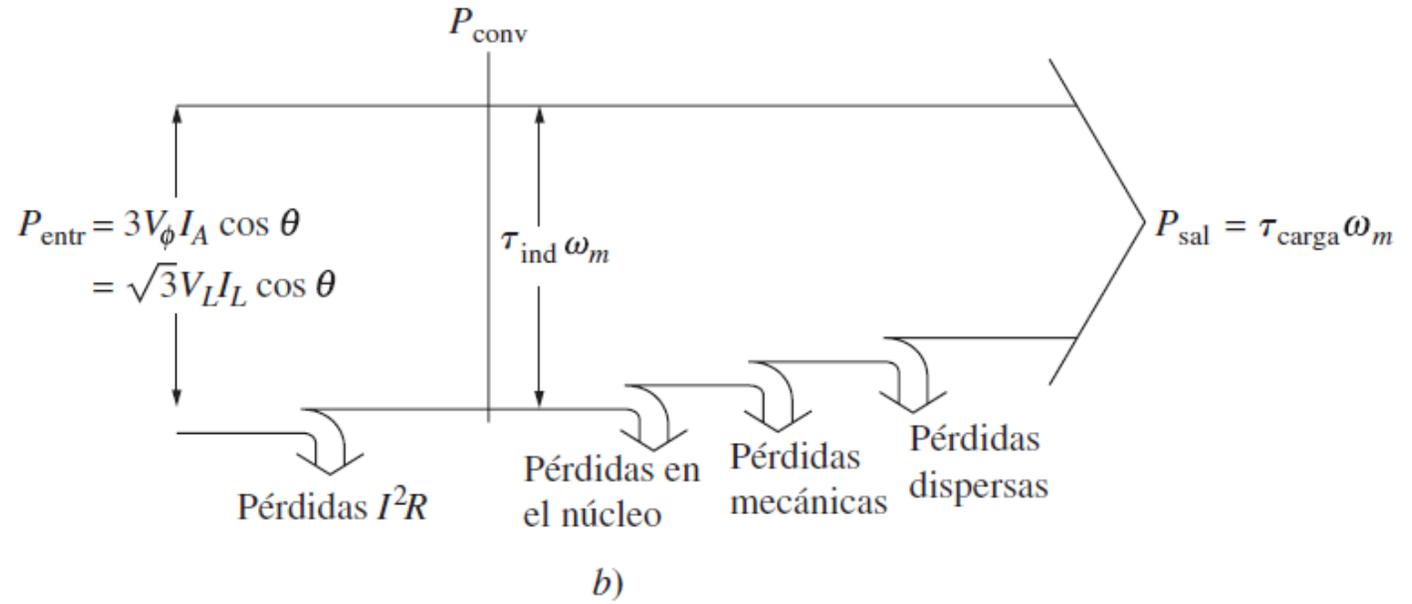


Diagrama de flujo de potencia – Motor de CA

Es el mismo diagrama, pero invertido.

Entrada: Potencia eléctrica

Salida: Potencia mecánica útil



⚡ Tipos de pérdidas en máquinas de CA

1. ⚡ Pérdidas eléctricas (I^2R o "en el cobre")
2. 🏠 Pérdidas en el núcleo
3. ⚙️ Pérdidas mecánicas
4. ❓ Pérdidas dispersas (adicionales)

FIGURA 3-21 a) Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico. b) Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico.

🔌 Pérdidas eléctricas (cobre)

➔ Por efecto Joule en los devanados:

- En el estator:

$$P_{CE} = 3I_A^2 R_A$$

- En el rotor (máquinas síncronas):

$$P_{CR} = I_F^2 R_F$$

📖 Dependen de la resistencia a temperatura normal de operación.

🏠 Pérdidas en el núcleo

Incluyen:

- Histéresis
- Corrientes parásitas

📖 Dependen de:

- B^2 : densidad de flujo magnético
- $n^{1.5}$: velocidad de rotación del campo magnético

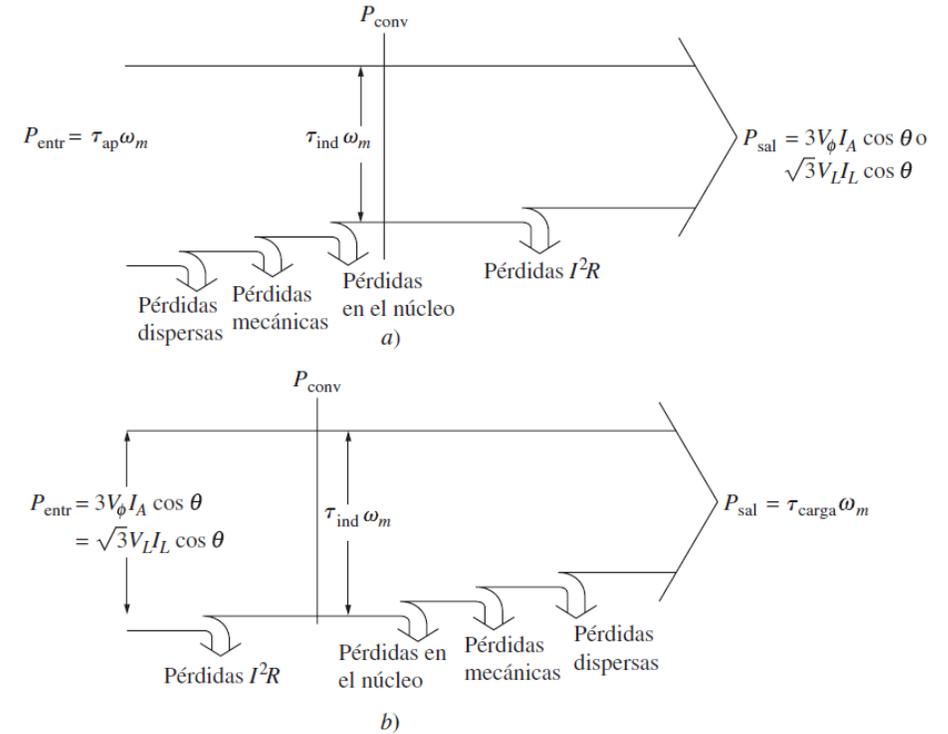


FIGURA 3-21 a) Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico. b) Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico.

⚙️ Pérdidas mecánicas

Dos tipos principales:

- **Fricción** en los cojinetes
- **Rozamiento con el aire**

📊 Varían con el **cubo de la velocidad de rotación**.

🌀 Se agrupan con las del núcleo como:

📌 Pérdidas rotacionales sin carga

? Pérdidas dispersas (misceláneas)

✦ Son pérdidas no clasificables en otras categorías.

📊 Se estiman típicamente como **1% de la potencia a plena carga**.

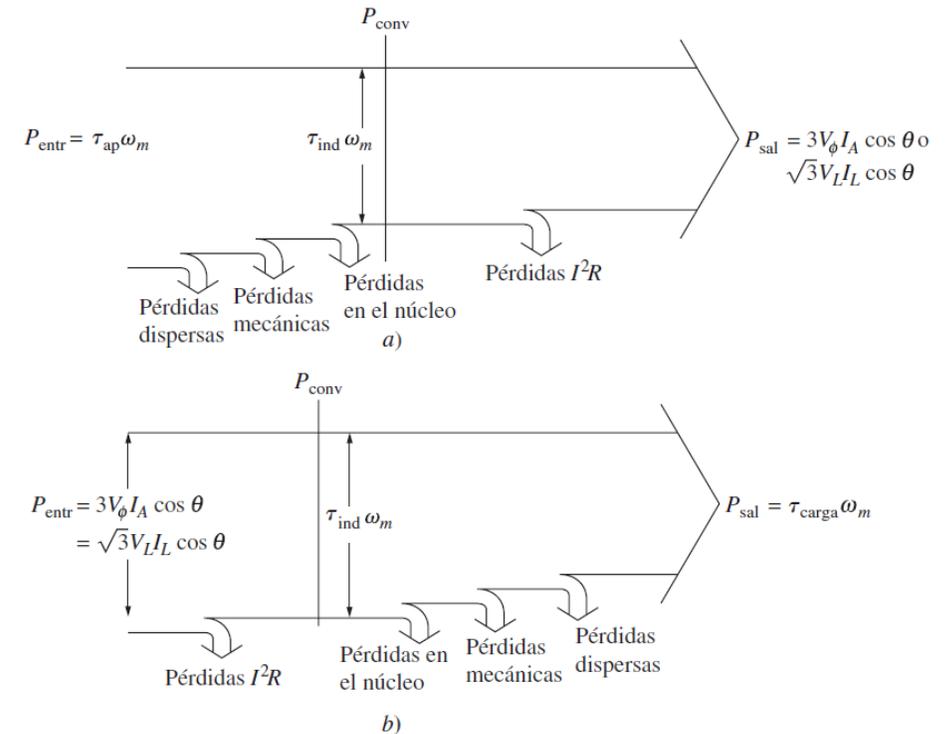


FIGURA 3-21 a) Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico. b) Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico.

Diagrama de flujo de potencia – Generador de CA

Entrada: Potencia mecánica

Salida: Potencia eléctrica útil

Pérdidas: en el núcleo, mecánicas, dispersas y eléctricas

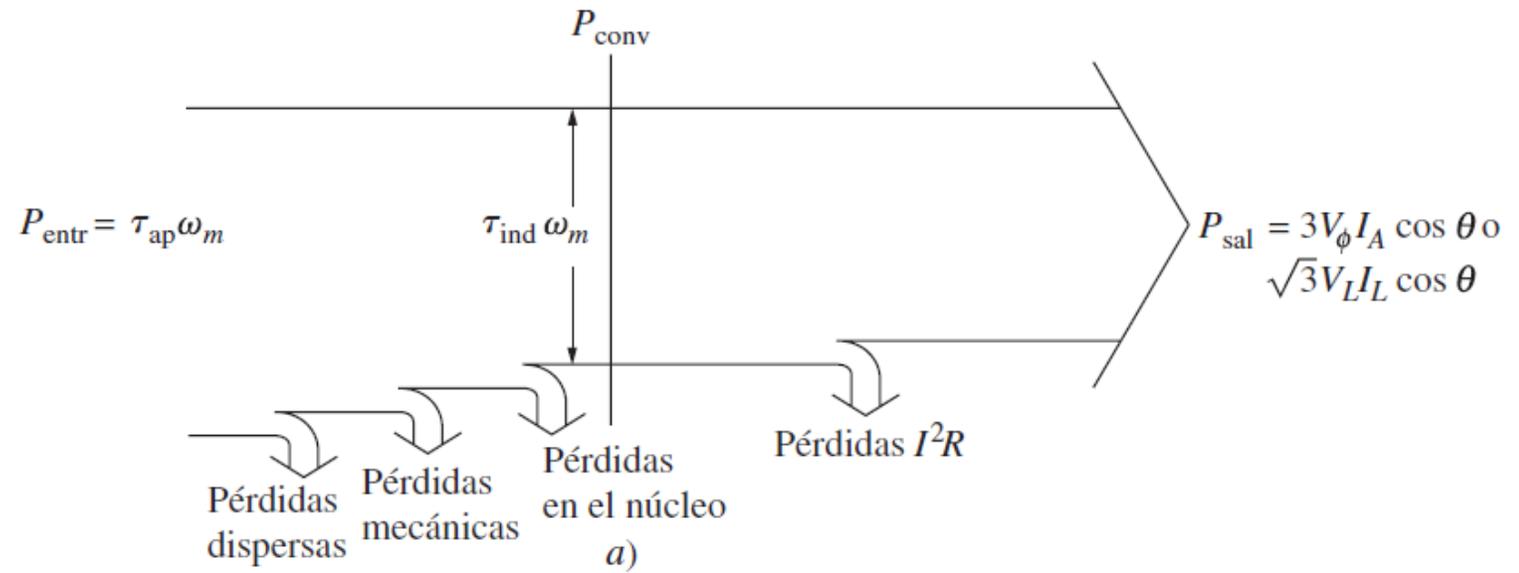


Diagrama de flujo de potencia – Motor de CA

Es el mismo diagrama, pero invertido.

Entrada: Potencia eléctrica

Salida: Potencia mecánica útil

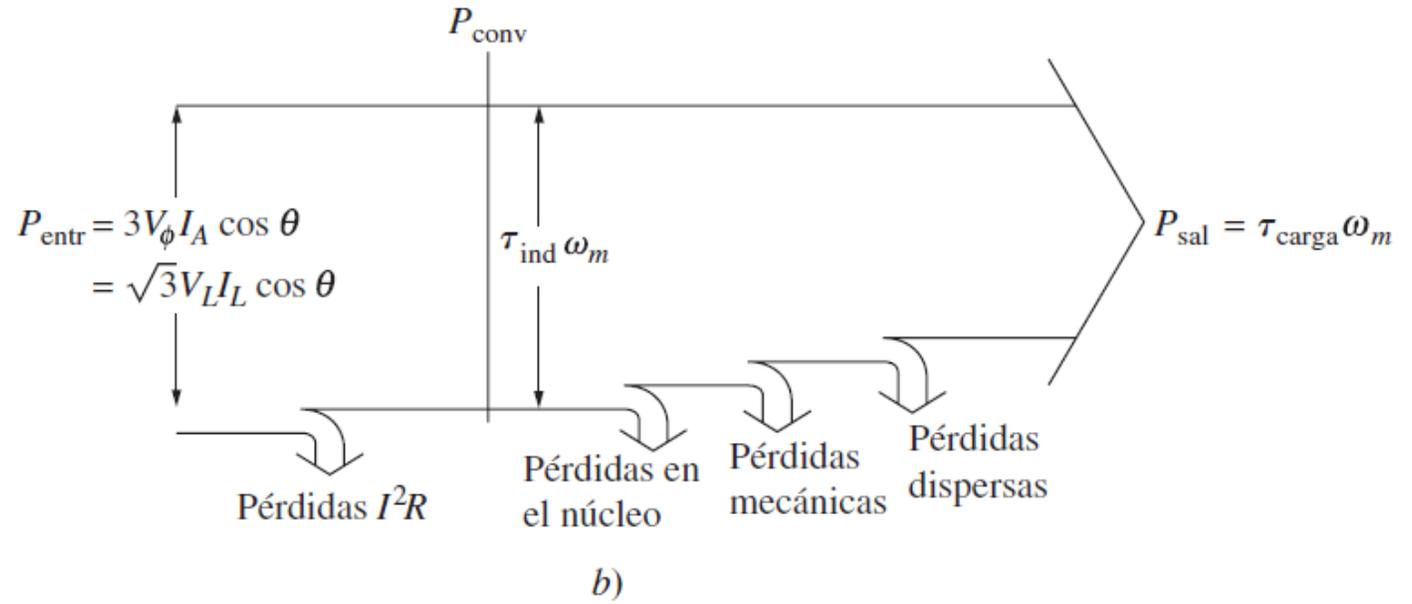


FIGURA 3-21 a) Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico. b) Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico.

Sección 3.8: Regulación de voltaje y velocidad

Puntos clave:

- Regulación de voltaje (VR): cómo cambia el voltaje del generador cuando varía la carga.
- Regulación de velocidad (SR): cómo varía la velocidad de un motor con la carga.

Analogía útil:

- Comparar VR con el "comportamiento" de un cargador de celular barato vs. uno de buena calidad: ¿puede mantener el voltaje constante cuando se exige más corriente?
- SR puede compararse con un carro en una subida: un auto con buena SR no desacelera tanto cuando se carga.

Fórmulas importantes:

$$VR = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100\% \quad \text{y} \quad SR = \frac{n_{sc} - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

Ejercicio propuesto:

- Si un generador tiene 230V en vacío y 210V a plena carga, ¿cuál es su VR?
- Si un motor gira a 1500rpm en vacío y 1440rpm con carga, ¿cuál es su SR?

Idea clave: buena regulación significa poca variación ante cambios de carga.

- **Regulación de voltaje (generadores):**

$$VR = \frac{V_{\text{sin carga}} - V_{\text{plena carga}}}{V_{\text{plena carga}}} \times 100\%$$

- VR positiva → el voltaje cae con la carga (caract. descendente).
- VR negativa → el voltaje sube (caract. ascendente).

- **Regulación de velocidad (motores):**

$$SR = \frac{n_{\text{sin carga}} - n_{\text{plena carga}}}{n_{\text{plena carga}}} \times 100\%$$

- SR positiva → baja la velocidad con carga (lo común).
- SR baja (o 0) → el motor mantiene bien su velocidad.

Obs: Definiciones de Chapman, recordar del tema “transformadores” que a veces se usan los valores *sin carga* en el denominador

Clase 17

FIN(G)
