

# Clases 14 y 15– TIM 71

## Máquinas eléctricas

**Fundamentos de máquinas de AC**

Tecnólogo Industrial Mecánico

---

12 y 14 de mayo de 2025

# Repaso Clase 13

**Acción motora y generadora en un alambre  
Máquina lineal de continua**

**Sección 1.8 (Chapman)**

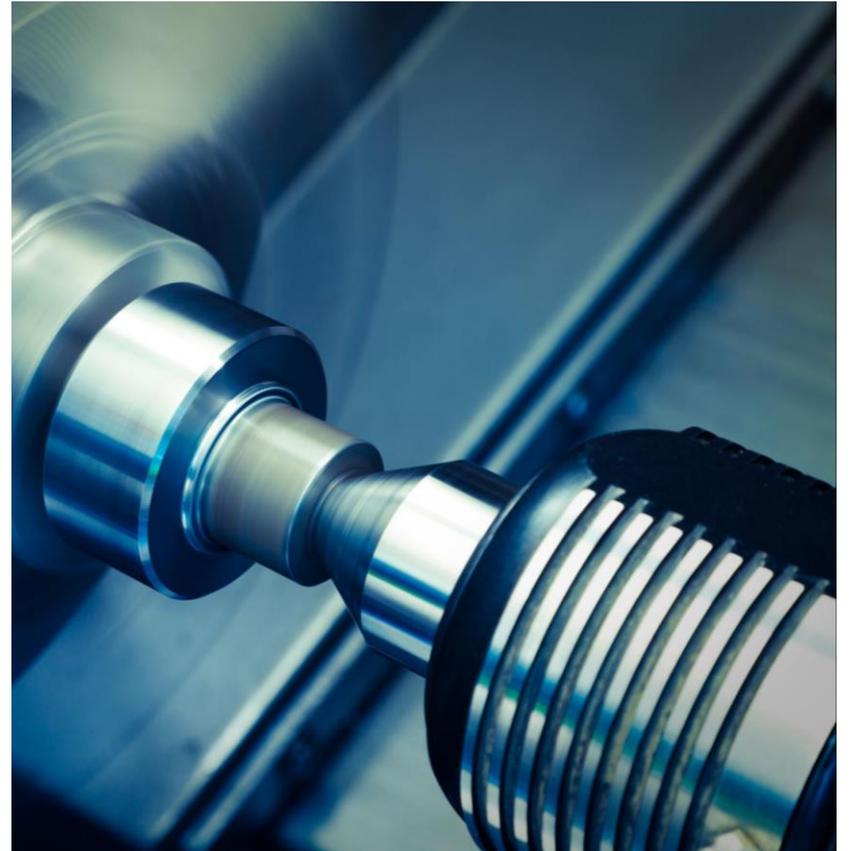
---

7 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)**



# ¿Por qué estudiamos primero la acción motora y generadora en un alambre?

- **Antes de estudiar máquinas rotativas, exploramos sus principios básicos** en un modelo más simple: la máquina lineal de continua  
- Este modelo permite visualizar fácilmente cómo un campo magnético genera fuerza o voltaje  
- Es una herramienta didáctica que facilita la comprensión de conceptos fundamentales sin la complejidad del rotor/estator  
- Permite enfocarnos en entender la física detrás del fenómeno

# Fuerza sobre un conductor con corriente ("acción motor")

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

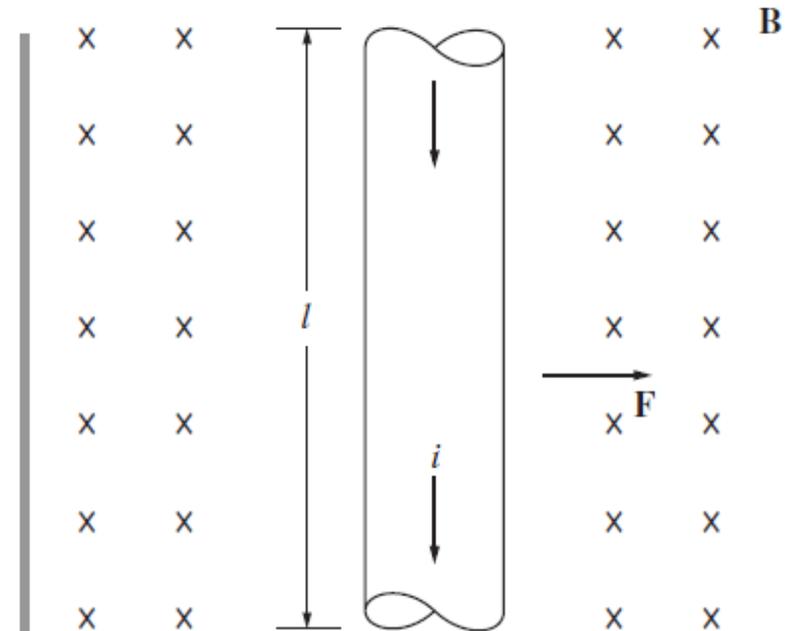
donde

$i$  = 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”)

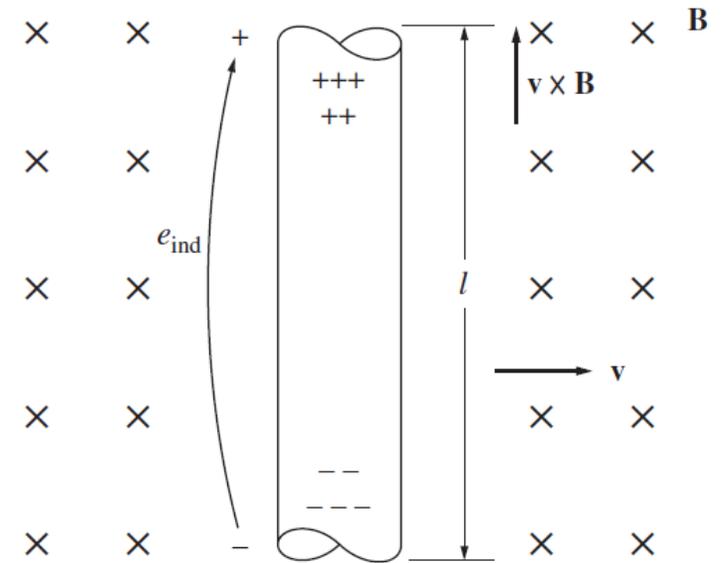
$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

donde

$\mathbf{v}$  = velocidad del alambre

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

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

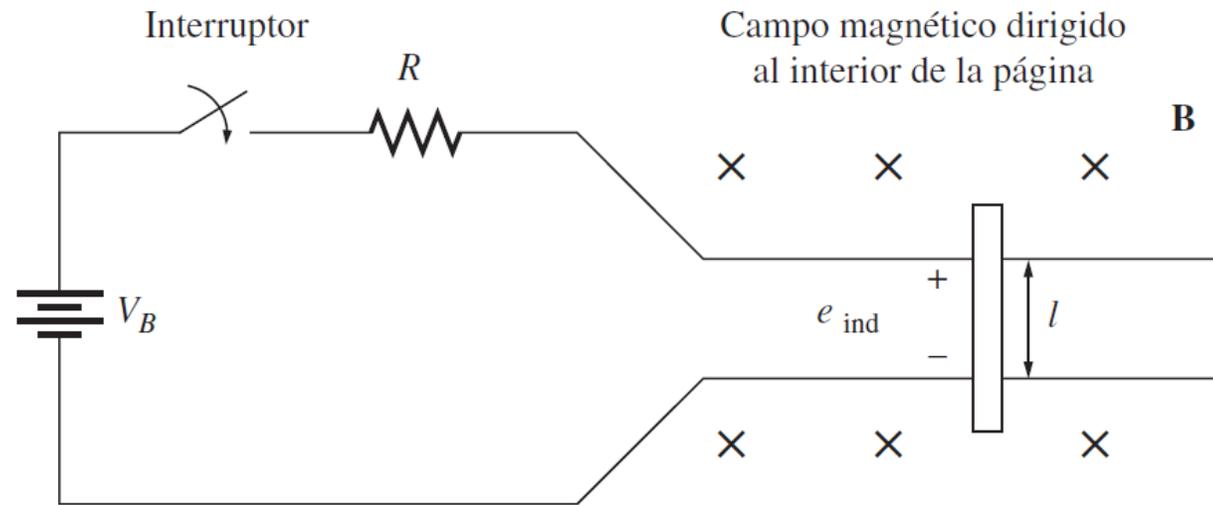


**FIGURA 1-17** Conductor que se mueve en presencia de un campo magnético.

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

- Es el modelo más simple de máquina eléctrica: fácil de visualizar y entender
- Permite repasar conceptos clave de electromagnetismo (y ya la vieron en Física 2)
- Funciona con los mismos principios que motores y generadores reales
- Aunque no tiene aplicaciones industriales, es útil para aprender la teoría



**FIGURA 1-19** Máquina lineal de cd. El campo magnético apunta hacia la página.

# Principios de funcionamiento

1. La ecuación para la fuerza aplicada al alambre conductor en presencia de un campo magnético:

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (1-43)$$

donde

$\mathbf{F}$  = fuerza aplicada al alambre

$i$  = magnitud de la corriente en el alambre

$\mathbf{l}$  = longitud del alambre; la dirección de  $\mathbf{l}$  está definida por el flujo de corriente

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

2. La ecuación del voltaje inducido en un alambre conductor que se mueve en un campo magnético:

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1-45)$$

donde

$e_{\text{ind}}$  = voltaje inducido en el conductor

$\mathbf{v}$  = velocidad en el alambre

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

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

3. La ley de voltaje de Kirchhoff de esta máquina. En la figura 1-19 puede apreciarse la aplicación de esta ley, la cual establece que:

$$V_B - iR - e_{\text{ind}} = 0$$

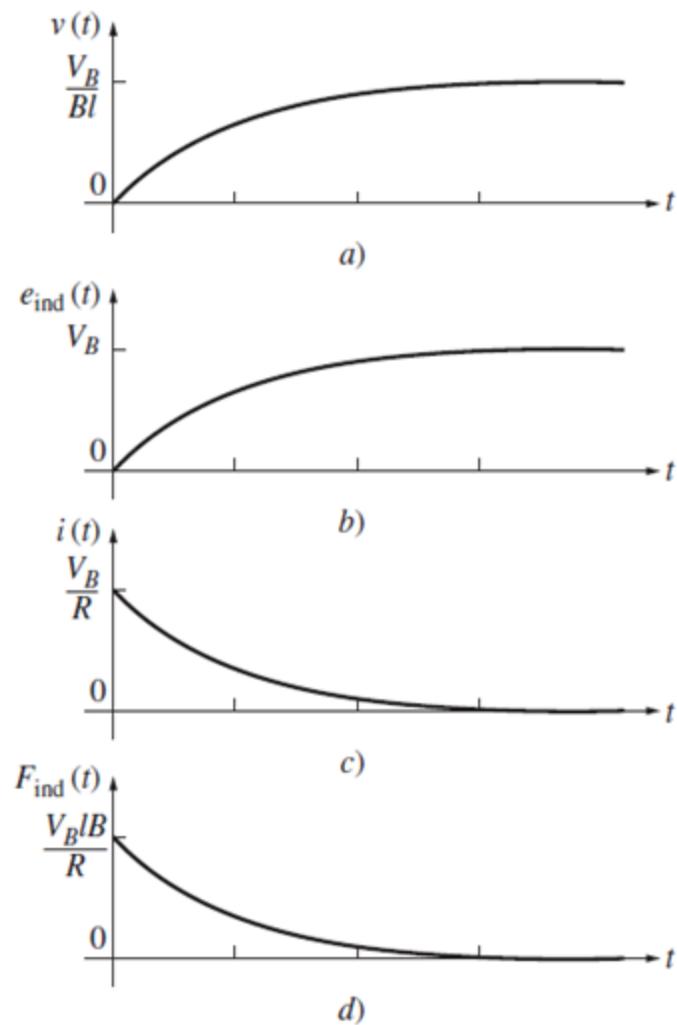
$$V_B = e_{\text{ind}} + iR = 0 \quad (1-46)$$

4. La ley de Newton de la barra que se mueve sobre la vía:

$$F_{\text{neta}} = ma$$

(1-7)

Ahora se explorará la conducta fundamental de esta máquina de cd sencilla, para lo cual se utilizarán como herramientas estas cuatro ecuaciones.



La barra continuará deslizándose a esta velocidad de vacío (sin carga) a menos que alguna fuerza exterior la altere. En la figura 1-21 se muestra la velocidad  $v$ , el voltaje inducido  $e_{ind}$ , la corriente  $i$  y la fuerza inducida  $F_{ind}$  cuando el motor está en marcha.

En resumen, el comportamiento durante el arranque de la máquina lineal de cd es el siguiente:

1. El cierre del interruptor produce un flujo de corriente  $i = V_B/R$ .
2. El flujo de corriente produce una fuerza en la barra, dada por  $F = ilB$ .
3. La barra se acelera hacia la derecha induciéndose en ella un voltaje  $e_{ind}$  a medida que se incrementa la velocidad.
4. El voltaje inducido reduce la corriente que fluye por la barra  $i = (V_B - e_{ind})/R$ .
5. La fuerza inducida entonces decrece ( $F = i \downarrow lB$ ) hasta hacerse  $F = 0$ . En este momento,  $e_{ind} = V_B$ ,  $i = 0$ , y la barra se mueve a velocidad de vacío constante  $v_{ee} = V_B/Bl$ .

Éste es el comportamiento observado en los motores reales durante el arranque.

## 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?

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

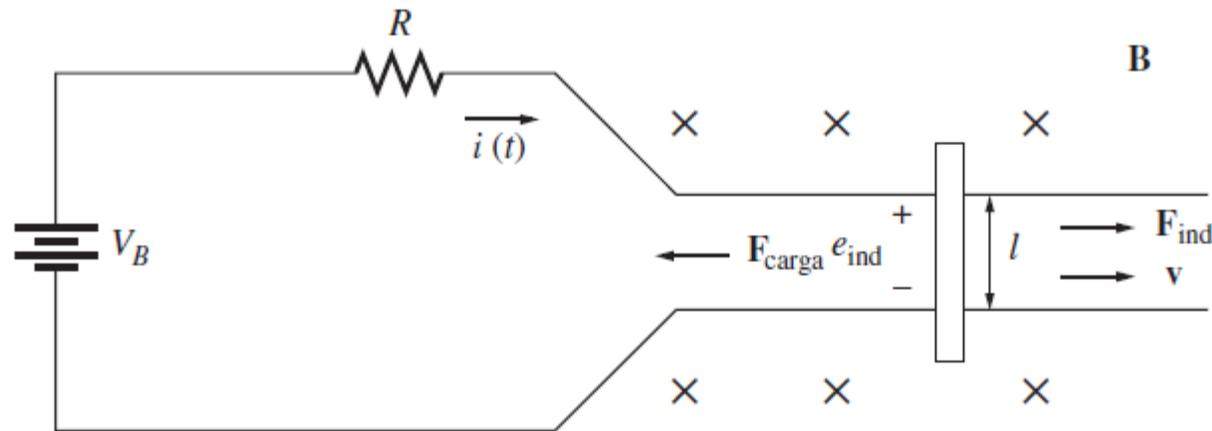


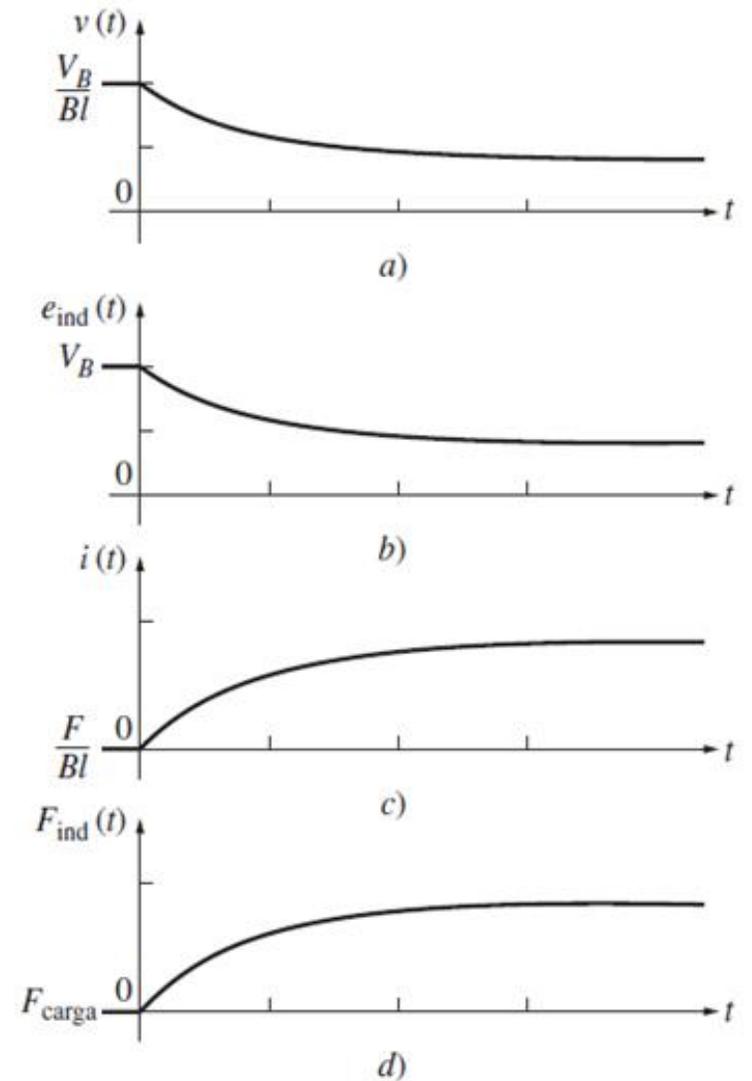
FIGURA 1-22 Máquina lineal de cd como motor.

La barra consume una cantidad de potencia eléctrica igual a  $e_{\text{ind}}i$ , reemplazada por potencia mecánica igual a  $F_{\text{ind}}v$ . Puesto que la potencia se convierte de eléctrica a mecánica, esta barra funciona como un *motor*.

El resumen de este comportamiento es:

1. Al aplicar una fuerza  $F_{\text{carga}}$  en dirección opuesta al movimiento resulta una fuerza neta  $F_{\text{neta}}$  opuesta a la dirección del movimiento.
2. La aceleración resultante  $a = F_{\text{neta}}/m$  es negativa, de modo que la barra disminuye la velocidad ( $v \downarrow$ ).
3. El voltaje  $e_{\text{ind}} = v \downarrow Bl$  cae, entonces  $i = (V_B - e_{\text{ind}} \downarrow)/R$  se incrementa.
4. La fuerza inducida  $F_{\text{ind}} = i \uparrow lB$  se incrementa a una velocidad menor  $v$  hasta que  $|F_{\text{ind}}| = |F_{\text{carga}}|$ .
5. Una cantidad de potencia eléctrica igual a  $e_{\text{ind}}i$  se convierte en potencia mecánica igual a  $F_{\text{ind}}v$ , y la máquina opera como un motor.

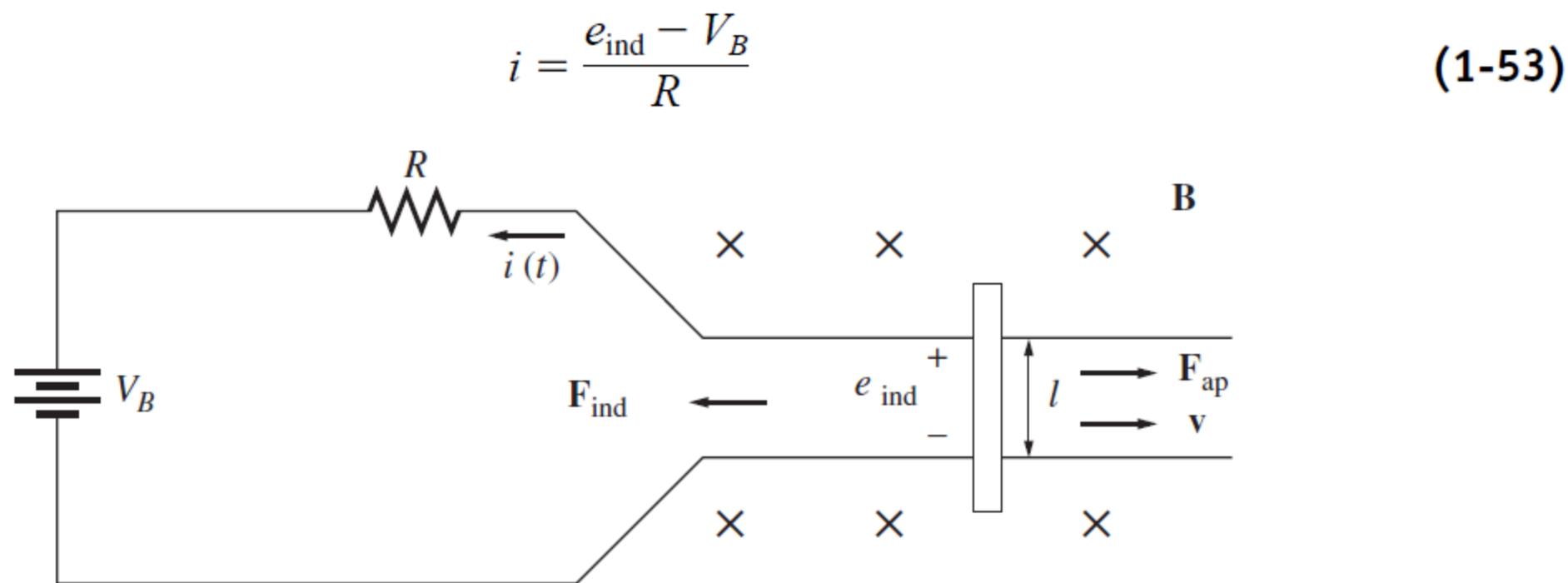
Un motor de cd real se comporta de manera análoga cuando se carga: cuando se coloca una carga en su eje, el motor comienza a disminuir la velocidad, con lo cual se reduce su voltaje interno y se incrementa el flujo de corriente. Este incremento del flujo de corriente aumenta el par inducido, el cual igualará al par de carga del motor a una nueva velocidad más baja.



**FIGURA 1-23** Máquina lineal de cd operando en condiciones de vacío y luego cargada como un motor. a) Velocidad  $v(t)$  como función del tiempo. b) Voltaje inducido  $e_{\text{ind}}(t)$ . c) Corriente  $i(t)$ . d) Fuerza inducida  $F_{\text{ind}}(t)$ .

## 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.

La dirección de la fuerza inducida está dada por la regla de la mano derecha. Esta fuerza inducida se opone a la fuerza aplicada sobre la barra.

Finalmente, la fuerza inducida será igual y opuesta a la fuerza aplicada, y la barra se moverá a una velocidad *mayor* que antes. Note que ahora *se está cargando la batería*. La máquina lineal actúa ahora como generador, convirtiendo la potencia mecánica  $F_{\text{ind}}v$  en potencia eléctrica  $e_{\text{ind}}i$ .

El resumen de este comportamiento es:

1. Si se aplica una fuerza  $\mathbf{F}_{\text{ap}}$  en la dirección del movimiento,  $\mathbf{F}_{\text{neta}}$  actúa en la dirección del movimiento.
2. Si la aceleración  $a = F_{\text{neta}}/m$  es positiva, la velocidad de la barra aumenta ( $v \uparrow$ ).
3. El voltaje  $e_{\text{ind}} = v \uparrow Bl$  se incrementa, y también se incrementa  $i = (e_{\text{ind}} \uparrow - V_B)/R$ .
4. La fuerza inducida  $F_{\text{ind}} = i \uparrow lB$  se incrementa a una velocidad mayor  $v$  hasta que  $|\mathbf{F}_{\text{ind}}| = |\mathbf{F}_{\text{carga}}|$ .
5. Al convertir una cantidad de potencia mecánica igual a  $F_{\text{ind}}v$  en potencia eléctrica  $e_{\text{ind}}i$ , la máquina opera como generador.

# Clase 14

**Principios de máquinas de AC (parte 1)**

**Sección 3.1 (Chapman)**

---

12 de mayo de 2025

# Planificación de clase -

 Tema	 Objetivo principal
Historia y reflexión inicial 	Contextualizar el interés por los imanes (Gilbert ~1600) y la brújula como origen del estudio del torque
Repaso de mecánica y torque en una espira 	Visualizar cómo un campo magnético produce torque: producto vectorial, ejemplo de la brújula
Fem inducida en una espira en rotación 	Entender cómo surge la corriente inducida en espiras móviles, mediante dos razonamientos complementarios

## ¿Por qué repasamos el movimiento rotatorio?

 Las máquinas eléctricas giran.

Para comprender su funcionamiento, es fundamental recordar cómo se describe ese movimiento.

 Este repaso será breve y se centrará en conceptos básicos:

- Posición angular
- Velocidad angular
- Aceleración angular
- Par (torque)
- Potencia mecánica

 Estos temas ya fueron abordados en Física I o II, pero ahora los aplicaremos en el contexto de las máquinas eléctricas reales.

# 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:

$\omega_m$  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

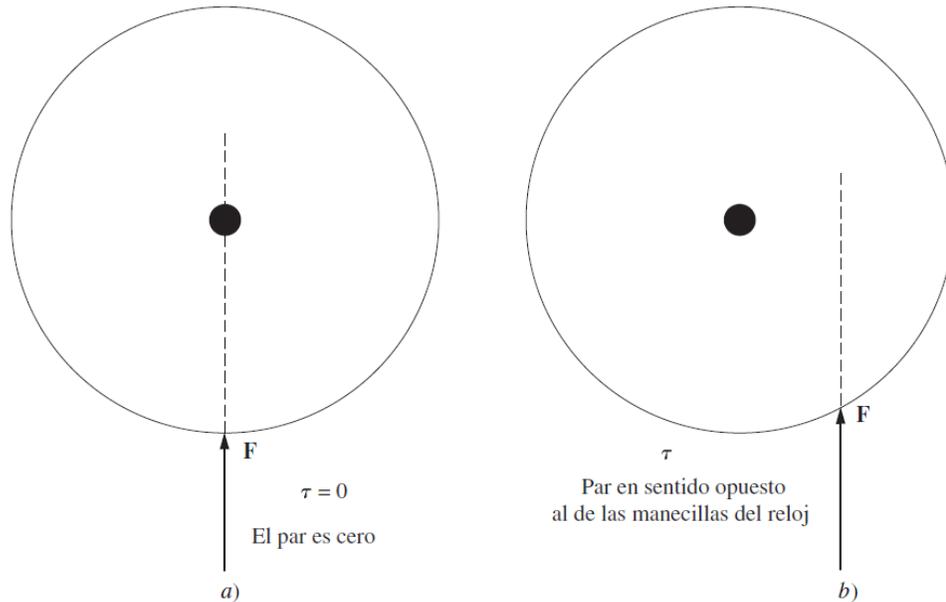
- Es la **tasa de cambio** de la velocidad angular.
- Se mide en **rad/s<sup>2</sup>**.
- Se denota como  $\alpha$ , análoga a la aceleración lineal  $a$ .

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

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

# Par (torque)

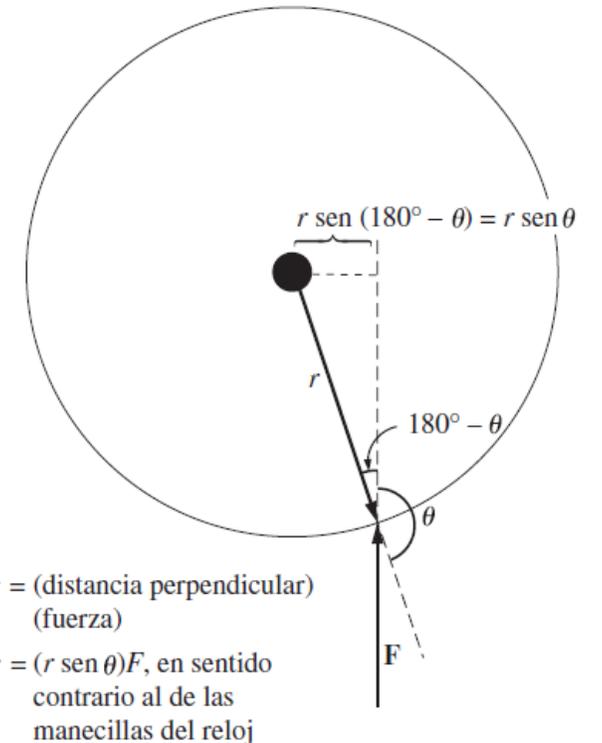
- Es la acción rotatoria de una fuerza.
- Depende de:
  - La **magnitud** de la fuerza
  - La **distancia** al eje donde se aplica



**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  $\tau$  va en sentido opuesto al de las manecillas del reloj.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\tau = rF \sin\theta$$



**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:
  - $\tau$ : newton-metro (N·m)
  - $J$ : kg·m<sup>2</sup>
  - $\alpha$ : rad/s<sup>2</sup>

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)
	= $3.725 \times 10^{-7}$ caballos de fuerza-hora (hp · h)
	= $2.778 \times 10^{-7}$ 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)	= $1.341 \times 10^{-3}$ hp
	= 0.7376 'pies • lbf/s
1 caballo de fuerza	= 746 W

## 🌐 Historia del Magnetismo y las Brújulas 🧭

### 1. Los primeros conocimientos sobre imanes y brújulas

- Desde la antigüedad, los imanes eran un misterio para muchas culturas.
- El uso de la brújula se remontaba al siglo XI en China, pero los europeos aún no comprendían su funcionamiento.

### 2. El secreto de los ingleses

- En los siglos XV y XVI, los marineros ingleses mantenían en secreto los detalles sobre cómo funcionaban las brújulas.
- Este conocimiento les daba una ventaja estratégica en la navegación.

### 3. William Gilbert y su descubrimiento (1600)

- En 1600, **William Gilbert**, médico de la reina Isabel I de Inglaterra, publicó "**De Magnete**", su obra maestra sobre el magnetismo.
- Fue el primero en demostrar que la Tierra misma actuaba como un gran imán, y explicó las propiedades de los imanes.

### 4. Electromagnetismo y su relación con las brújulas

- Las primeras investigaciones sobre electromagnetismo estaban motivadas por el comportamiento curioso de las brújulas.
- Se notaba que las brújulas se desviaban en presencia de **cargas estáticas**, lo que eventualmente condujo a la relación entre electricidad y magnetismo.

## 🔄 Reflexionemos sobre el Torque y las Brújulas 🧭

### 1. El juego con imanes y brújulas

- ¿Quién no ha jugado alguna vez con un imán y una brújula?
- Todos sabemos que **las brújulas apuntan al norte**, y si giramos el imán, la brújula se alinea con él.

### 2. ¿Por qué gira la brújula?

- Al girar el imán, estamos creando un **campo magnético rotatorio**.
- La brújula, al estar **conectada al campo magnético**, **tiende a alinearse** con la dirección de este campo.

### 3. Intuición detrás del giro

- **Torque = Producto vectorial**: Cuando un imán interactúa con una brújula, el torque (el giro) ocurre debido a la **fuerza magnética** que actúa sobre la brújula.
- Cuando el campo magnético de un imán cambia, **la brújula gira** hasta alinearse con él, ¡lo mismo ocurre con el campo giratorio en una máquina!

### 4. De lo simple a lo complejo

- Este comportamiento que experimentamos jugando con imanes y brújulas es lo que estudian los ingenieros en las máquinas de corriente alterna: cómo los **campos magnéticos rotatorios** generan movimientos y fuerzas.

## 🧠 La fem inducida: no tan intuitiva ⚡

(Faraday, 1830)

🔍 Antes de Faraday:

Se observaban efectos curiosos (como la desviación de brújulas por cargas eléctricas), pero **no se sabía si un campo magnético variable podía generar corriente.**

📐 Faraday descubre que:

| Un **cambio en el flujo magnético** a través de una espira genera una **fem inducida.**

🚲 **Fem de movimiento:**

Cuando una espira **se mueve** dentro de un campo magnético, el flujo cambia por el movimiento → se induce una corriente.

■ En este curso:

Ya estudiamos en detalle la ley de Faraday al inicio, porque es **fundamental para entender cómo funcionan las máquinas eléctricas.**

# 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.

## Espira Sencilla en un Campo Magnético Uniforme

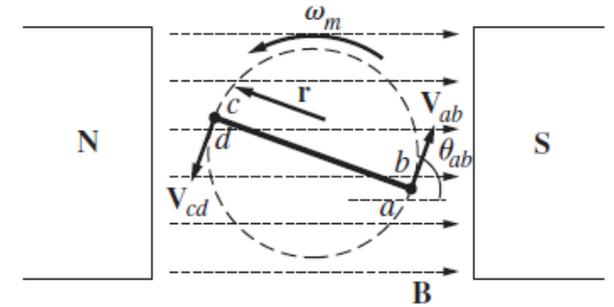
### 🌀 Modelo más simple de generador de CA:

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

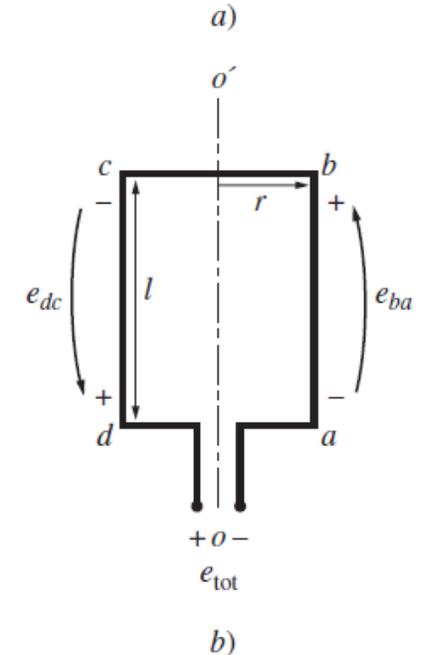
### ⚙️ Componentes:

- **Campo magnético (B):** fijo, dirección horizontal.
- **Espira rotante:** lados perpendiculares y paralelos al plano.
- **Velocidad angular ( $\omega$ ):** 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:

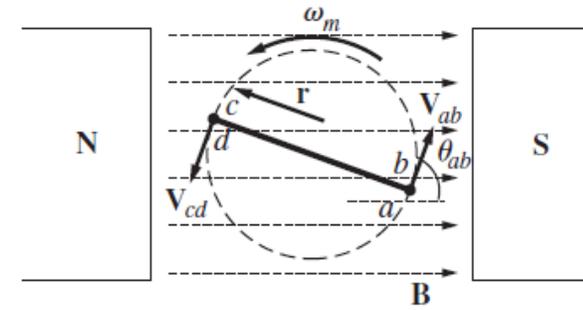
$$e_{\text{ind}} = 2vBl \sin \theta$$

donde:

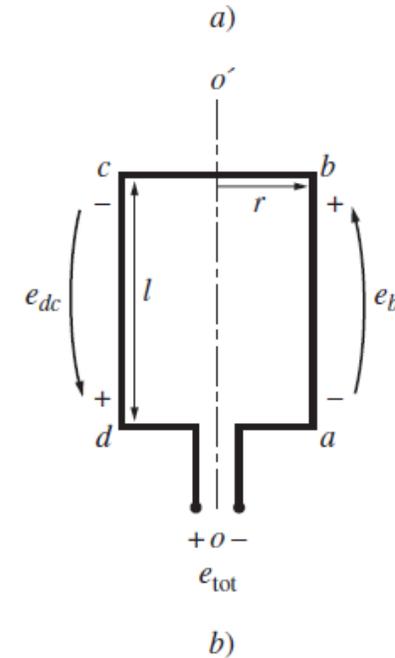
- $v$ : velocidad tangencial de los conductores
- $l$ : longitud activa del conductor
- $\theta$ : ángulo entre el conductor y el campo

### Segmentos de la espira:

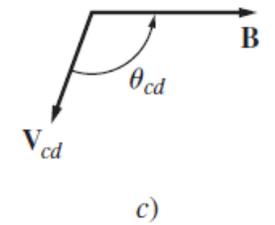
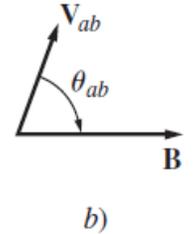
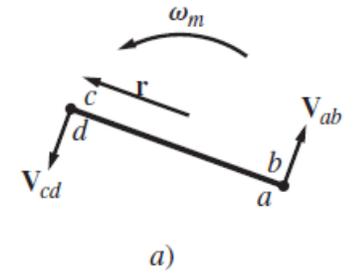
- **ab y cd**: contribuyen con voltaje  $\rightarrow \sin \theta$
- **bc y da**: no inducen voltaje (movimiento  $\perp$  a B)



**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:

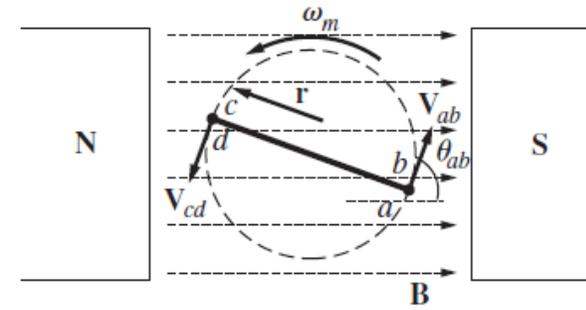
- $\theta = \omega t$
- $v = r\omega$
- $A = 2rl$

📌 Se llega a:

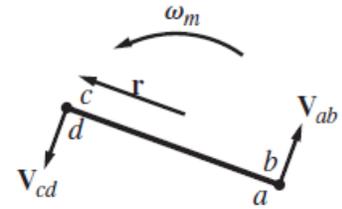
$$e_{\text{ind}} = AB\omega \sin(\omega t)$$

📌 Como:

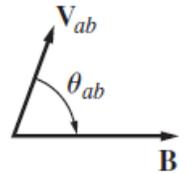
$$\phi_{\text{máx}} = AB \Rightarrow e_{\text{ind}} = \phi_{\text{máx}}\omega \sin(\omega t)$$



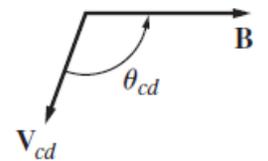
B es un campo magnético uniforme, alineado como puede apreciarse.



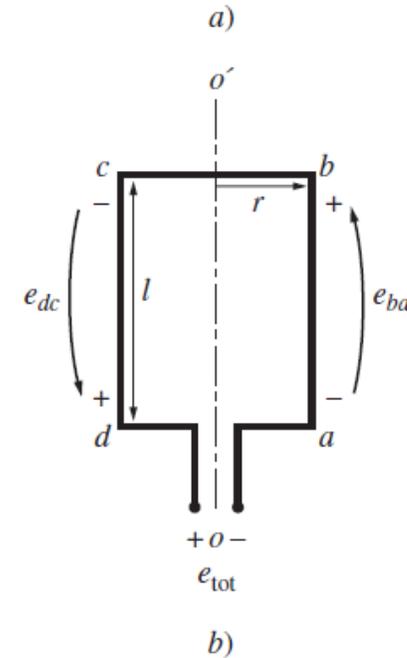
a)



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:

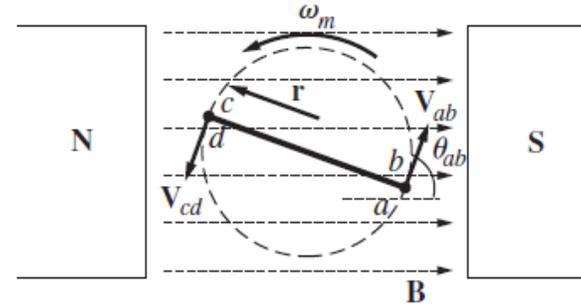
$$\frac{d\phi}{dt} = -BA\omega \sin(\omega t)$$

🎯 Resultado:

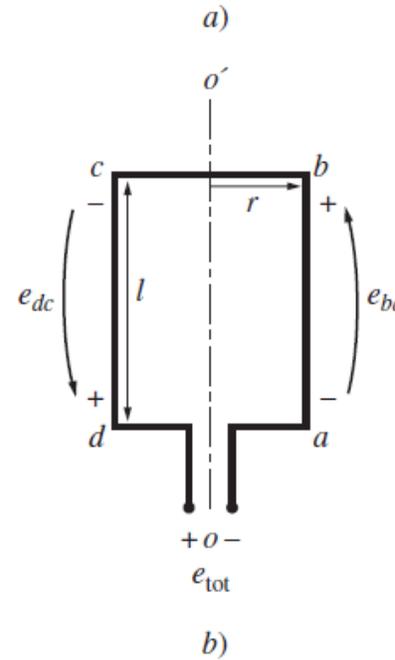
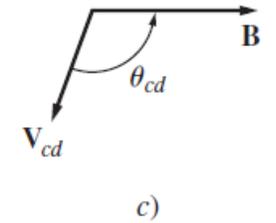
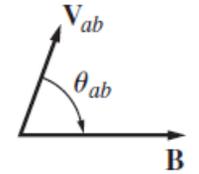
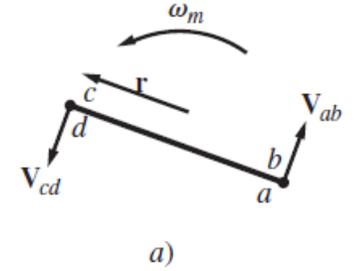
$$e_{\text{ind}} = BA\omega \sin(\omega t)$$

🌱 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  $\omega$
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):

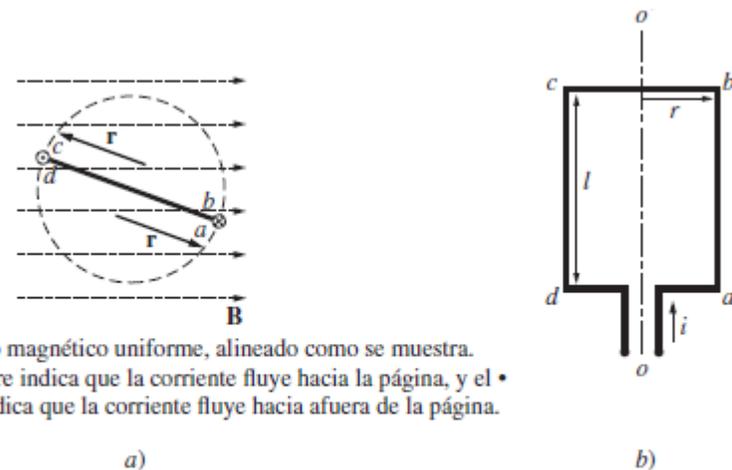
- Segmentos **ab** y **cd** aportan par.
- Segmentos **bc** y **da** no generan par (fuerza no tiene brazo de palanca).

📊 Para un segmento:

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

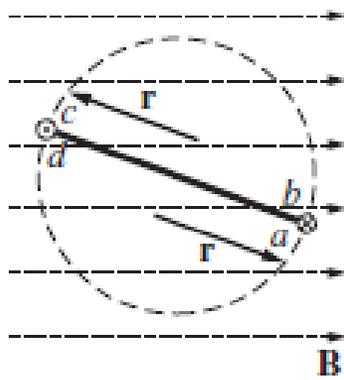
📦 Par total inducido:

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

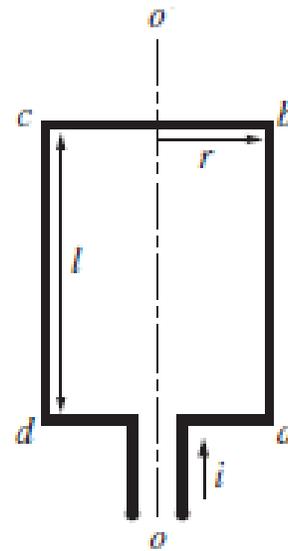


**B** es un campo magnético uniforme, alineado como se muestra. La  $\times$  en el alambre indica que la corriente fluye hacia la página, y el  $\bullet$  en el alambre indica que la corriente fluye hacia fuera de la página.

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



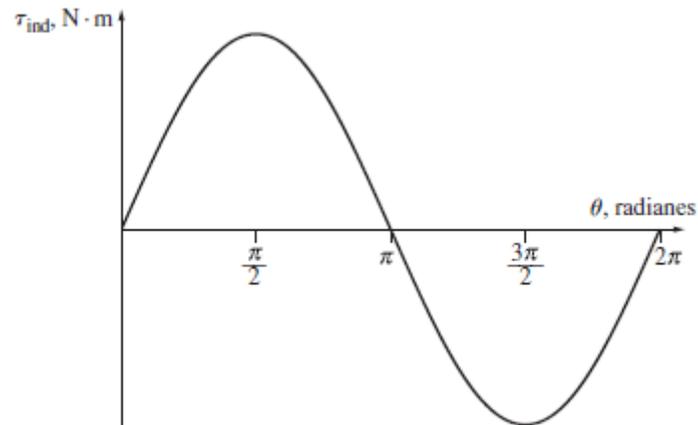
a)



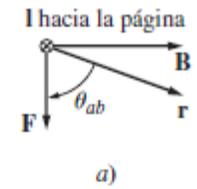
b)

$\mathbf{B}$  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.

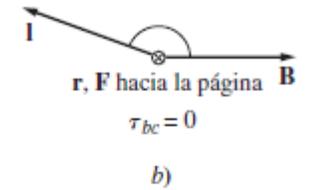
**FIGURA 3-4** Una espira con corriente en un campo magnético uniforme. a) Vista de frente; b) vista de la bobina.



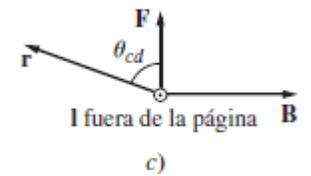
**FIGURA 3-6** Gráfica de  $\tau_{ind}$  y  $\theta$ .



a)

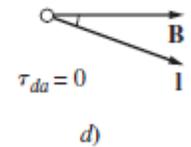


b)



c)

$\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{F}$  fuera de la página



d)

**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.

# Clase 15

**Principios de máquinas de AC (parte 2)**

**Sección 3.2 (Chapman)**

---

12 de mayo de 2025

# Recursos (a discutir en clase)

- <https://www.youtube.com/watch?v=CWulQ1ZSE3c> (hasta 5min)
- [https://www.youtube.com/watch?v=wqrGHeuxUvl&list=PLuUdFsbOK\\_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=wqrGHeuxUvl&list=PLuUdFsbOK_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=7)
- [https://www.youtube.com/watch?v=8XF-11MQGQ0&list=PLuUdFsbOK\\_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=20](https://www.youtube.com/watch?v=8XF-11MQGQ0&list=PLuUdFsbOK_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=20)

# Planificación de clase

 Tema

 Objetivo principal

Campo magnético giratorio 

Comprender cómo tres corrientes desfasadas generan un campo que gira, y cómo varía con el número de polos

Cambio de sentido de giro  
(inversión de fases)  → 

Explicar cómo intercambiar fases invierte el giro del campo magnético

Síntesis y cierre 

Reforzar conceptos clave: torque, fem, campo giratorio.  
Conectar con lo aprendido en la mitad anterior

(Opcional: Videos) 

Visualizar con animaciones o experimentos simples lo que se discutió intuitivamente

## 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  $120^\circ$  eléctricamente.
- Cada bobina recibe una corriente alterna desfasada  $120^\circ$  respecto a las otras.
- El resultado es que los campos magnéticos de cada fase se suman y crean un campo resultante que gira.

## 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.

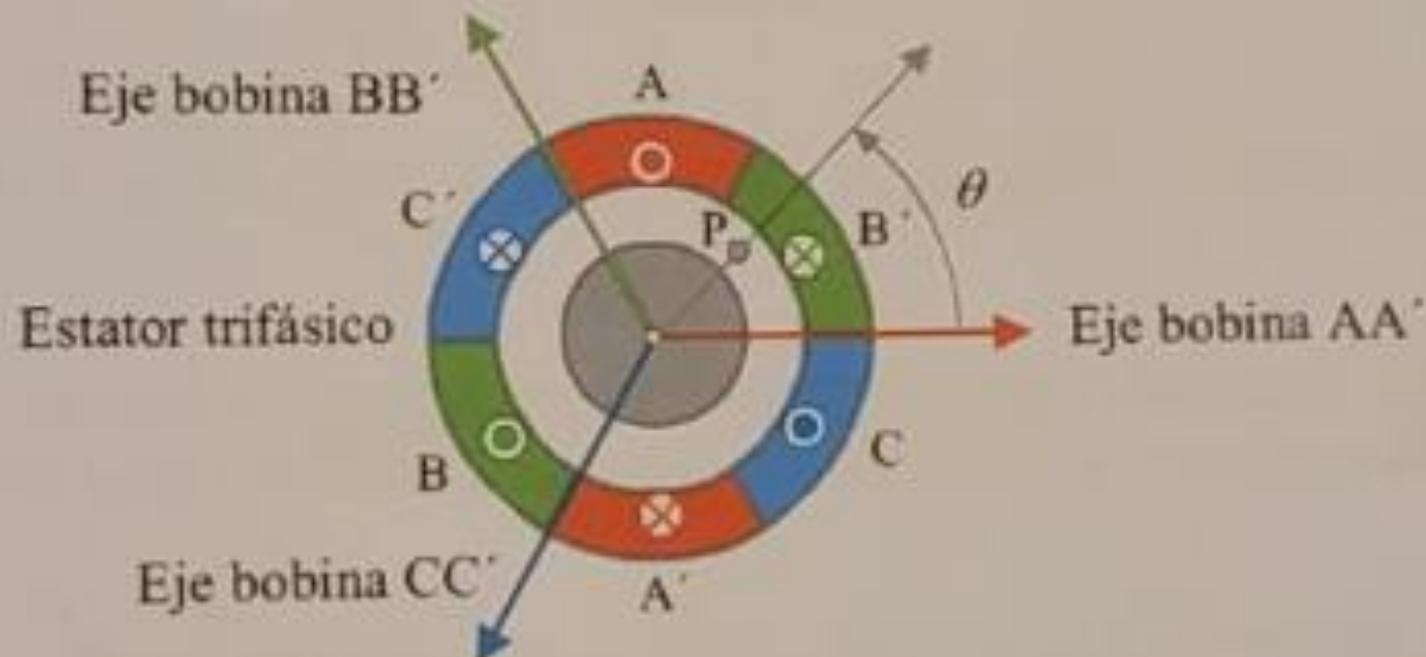


Figura 2.26. Tres devanados desfasados en el espacio  $120^\circ$  eléctricos

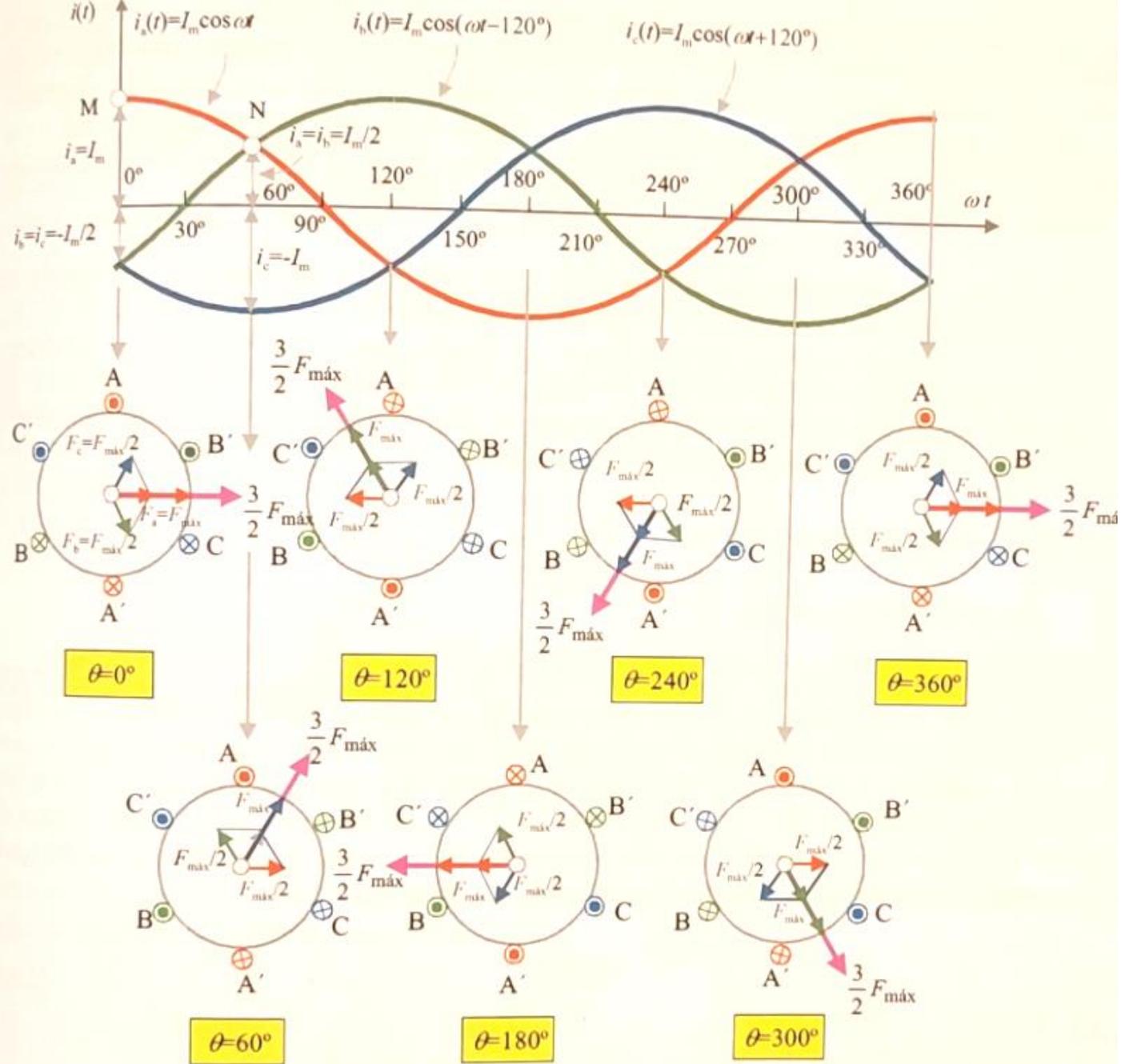


Figura 2.27. F.m.m. de un devanado trifásico alimentado con corrientes trifásicas

# Videos: campo giratorio

- [https://www.youtube.com/watch?v=wqrGHeuxUvI&list=PLuUdFsbOK\\_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=8&ab\\_channel=SabinCivilEngineering](https://www.youtube.com/watch?v=wqrGHeuxUvI&list=PLuUdFsbOK_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=8&ab_channel=SabinCivilEngineering)
- [https://www.youtube.com/watch?v=Fs0DJnHK2Y8&ab\\_channel=BuddyBurks](https://www.youtube.com/watch?v=Fs0DJnHK2Y8&ab_channel=BuddyBurks)
- [https://www.youtube.com/watch?v=YYHHlnIpUVg&ab\\_channel=IECtv](https://www.youtube.com/watch?v=YYHHlnIpUVg&ab_channel=IECtv)
- [https://www.youtube.com/watch?v=SiZ-mak4h4s&ab\\_channel=RoddyMcNamee](https://www.youtube.com/watch?v=SiZ-mak4h4s&ab_channel=RoddyMcNamee)
- [https://www.youtube.com/watch?v=h-BIHJM-IGQ&lc=UgxxQ6EXJZdPm\\_90VLJ4AaABA&ab\\_channel=ProfessorEssamHamdi](https://www.youtube.com/watch?v=h-BIHJM-IGQ&lc=UgxxQ6EXJZdPm_90VLJ4AaABA&ab_channel=ProfessorEssamHamdi)

## Analogía Visual

 Imaginá tres personas haciendo girar a un niño que está sentado en el carrusel de una placita: Cada una empuja desde un lugar diferente y con ritmo constante, una tras otra.

□ Resultado: el carrusel gira suavemente gracias a la coordinación.

 Ideas clave para recordar:

- Tres corrientes → tres campos magnéticos → un solo campo magnético rotante.
- El campo rotante es el resultado de la superposición de los tres campos.
- El rotor tiende a alinearse con ese campo en movimiento.

## ¿Por qué es importante?

 Este campo magnético giratorio es el principio de funcionamiento de los motores de AC.

 Entender cómo se genera permite comprender cómo se produce el par que hace girar el rotor.

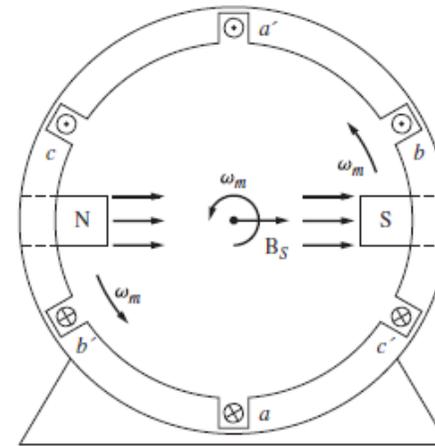
 Es una idea fundamental para todo el estudio posterior de las máquinas rotativas.

## ⚙ 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:

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

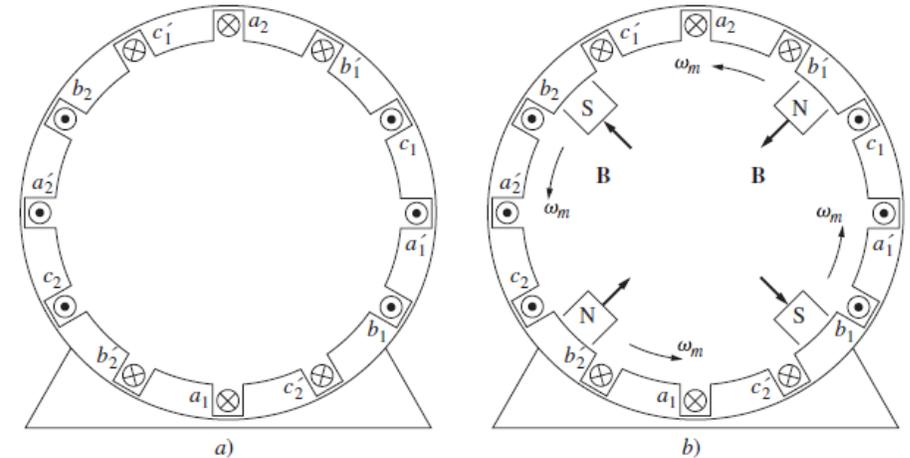
- O en términos de velocidad angular:

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

## 🔄 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



[https://www.youtube.com/watch?v=8XF-11MQGQ0&list=PLuUdFsbOK\\_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=21&ab\\_channel=SabinCivilEngineering](https://www.youtube.com/watch?v=8XF-11MQGQ0&list=PLuUdFsbOK_8qVROrfl2M2WSV2xAz-ABVU&index=21&ab_channel=SabinCivilEngineering)

## 🔄 ¿Por qué el campo magnético gira más lento cuando hay más polos?

### 🔧 Imaginemos...

- El **campo magnético** se mueve de **polo norte a polo sur** por la superficie del estator.
- En una máquina de **1 par de polos** (2 polos), solo hay **una pareja** de polos: el campo necesita dar **una vuelta completa** para pasar por norte y sur una vez.

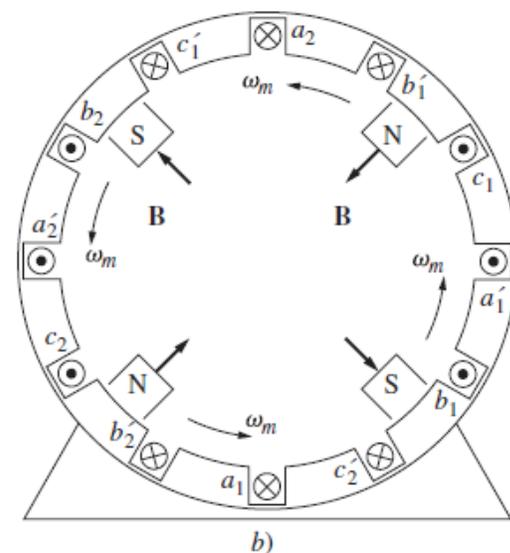
### Ahora bien...

- Si tenés **2 pares de polos** (4 polos), hay **dos grupos de norte-sur** repartidos en el estator.
- Entonces el campo no tiene que dar toda la vuelta para hacer un ciclo: con solo **media vuelta mecánica**, ya pasó por **los dos polos** del primer par.
- ¡Pero la electricidad sigue completando un ciclo entero! El campo se mueve **la mitad de rápido** que antes.

### 🎯 Entonces...

Cada vez que **duplicás la cantidad de pares de polos**, el campo da la **mitad de vueltas mecánicas** por cada ciclo eléctrico. Por eso:

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



## Inversión de la Dirección de Rotación

- La **dirección de giro** del campo magnético está relacionada con la **dirección de rotación de los fasores** de corriente.
- Si las fases en el estator siguen una **secuencia directa** (A-B-C), el campo magnético gira en un **sentido** (👉 **antihorario**).
- **Intercambiando dos fases** (por ejemplo, B y C), la secuencia de fases cambia a **indirecta** (C-B-A).
- Este cambio hace que los fasores roten en **sentido opuesto** (👉 **horario**).
- Como resultado, el **campo magnético** gira en sentido opuesto, **invirtiendo la dirección de rotación** del motor.

Este es el principio que permite **invertir el sentido de giro** de un motor de corriente alterna. ⚡ 

<https://www.youtube.com/watch?v=kbqWKbZOr9w>

## 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.

# Recapitulando

## 3. Campo Magnético Giratorio

- Un **devanado trifásico** con corrientes desfasadas  $120^\circ$  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** (**fe**) está relacionada con la **velocidad del campo magnético giratorio** (**fm**).
- Cuantos más **polos magnéticos** haya en el estator, **más lento gira** el campo magnético en comparación con la frecuencia eléctrica.
- La relación general entre **fe** y **fm** 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.  

# Próxima semana

## ■ Temas (Chapman, Cap. 3):

- ◆ 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