



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE MISIONES



FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
UNaM

2024 - año de la defensa de la vida, la libertad y la propiedad

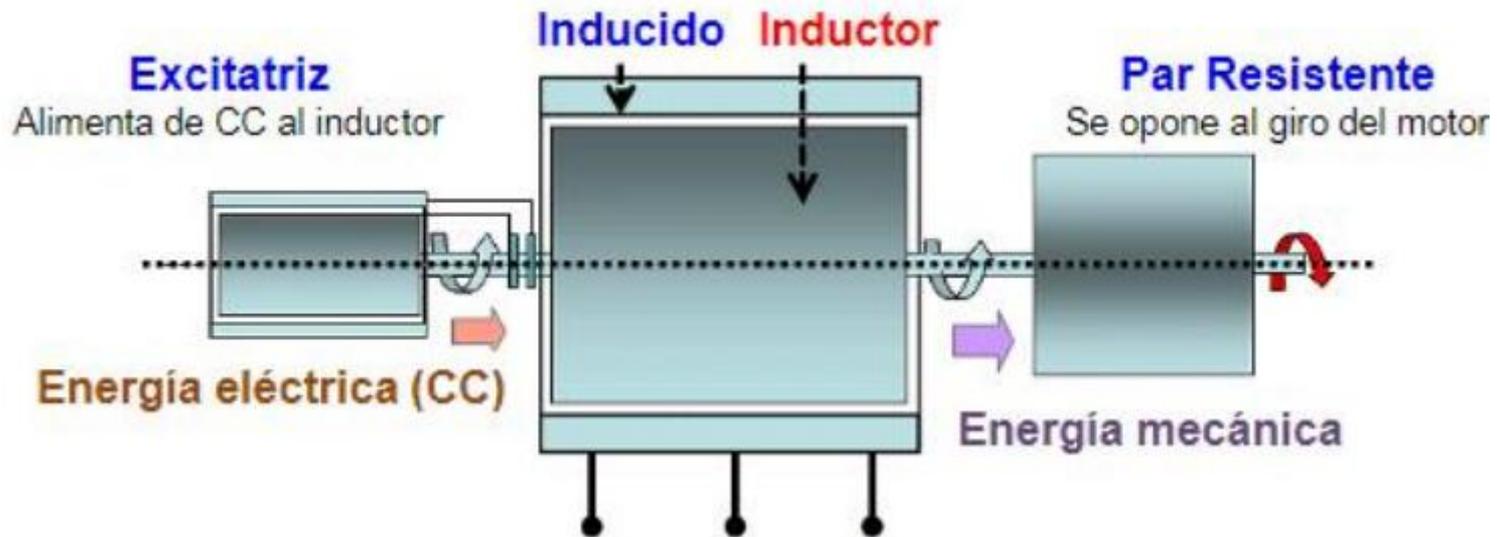
# ACTUADORES ELECTROMECAÑICOS

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



# MOTORES SINCRONOS

Los **motores síncronos** son un tipo de máquina eléctrica de corriente alterna (CA) cuya velocidad de rotación es constante y sincronizada con la frecuencia de la fuente de alimentación. Esto significa que la velocidad de rotación del rotor es exactamente igual a la velocidad del campo magnético giratorio generado por el estator, sin deslizamiento como ocurre en los motores asíncronos.



# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

- La máquina sincrónica es reversible constructivamente el motor es igual al generador.
- El principio de funcionamiento se basa en que el estator esta alimentado por un sistema de corrientes trifásicas.
- El sistema trifásico genera un **CAMPO ROTANTE**



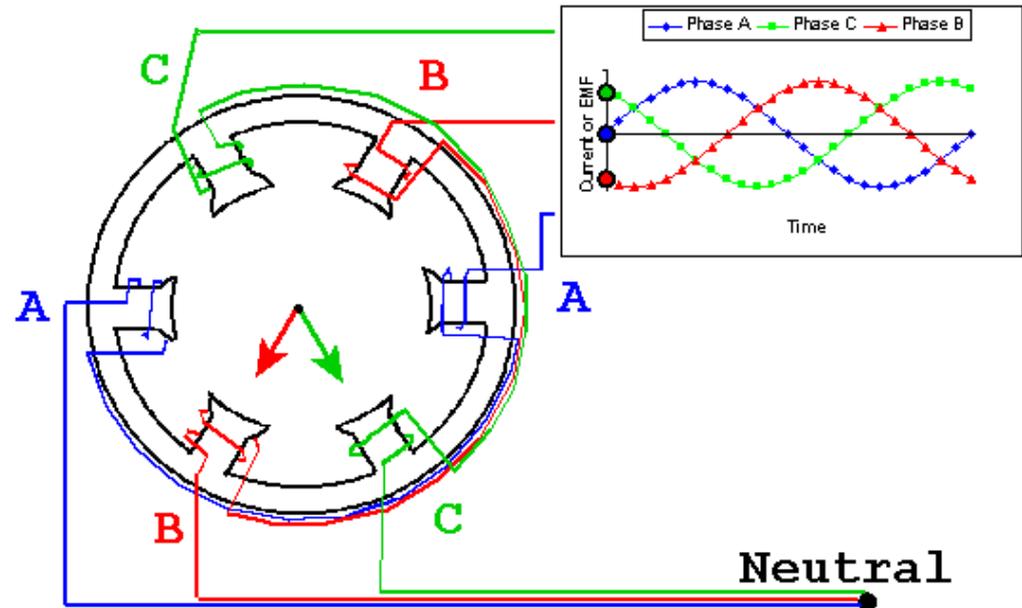
# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

## Ecuación básica:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

- $n_s$  es la velocidad síncrona (en revoluciones por minuto, RPM),
- $f$  es la frecuencia de la fuente de alimentación (en Hz),
- $p$  es el número de polos del motor.

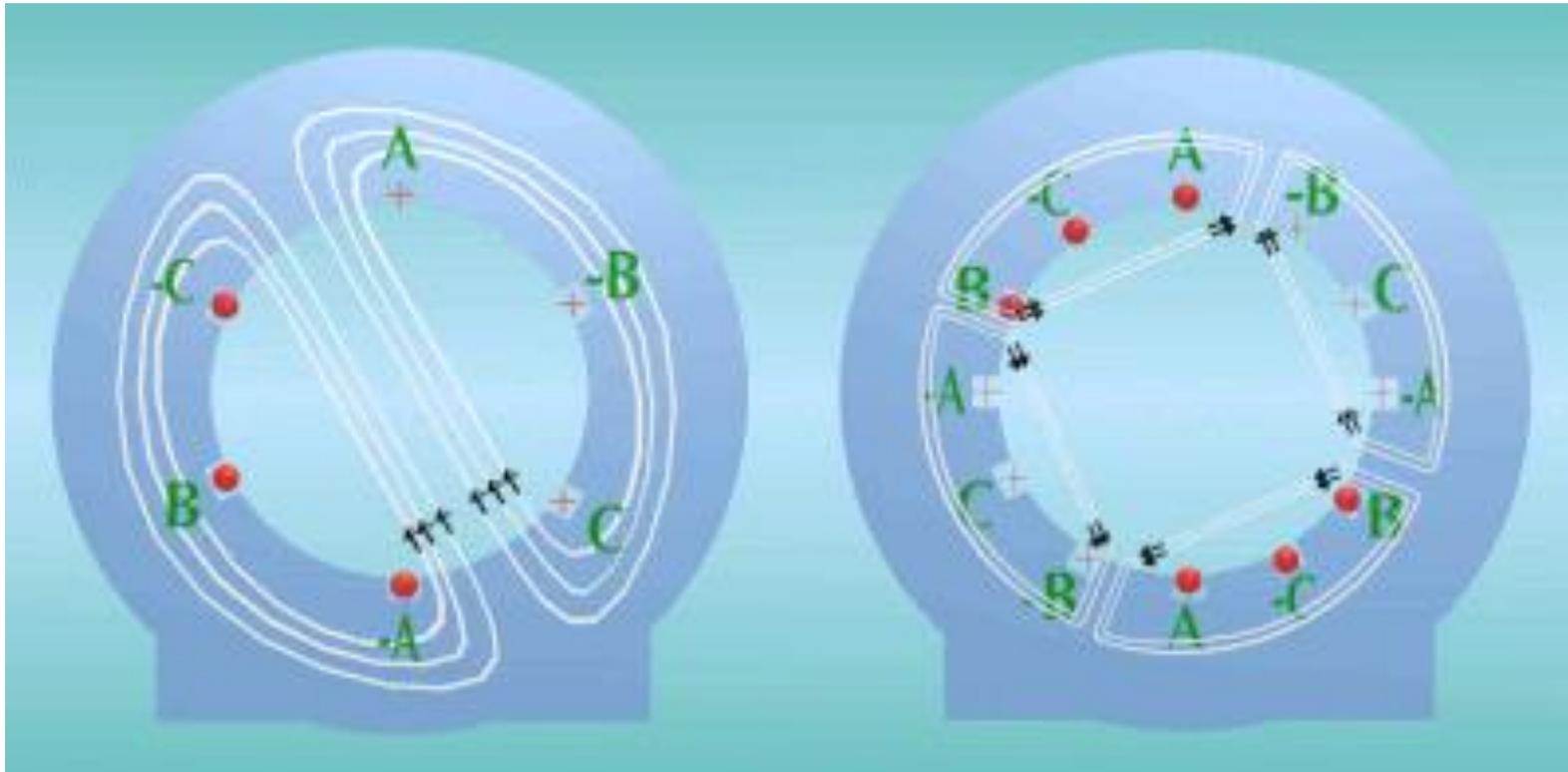
## Campo Magnético Giratorio



# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

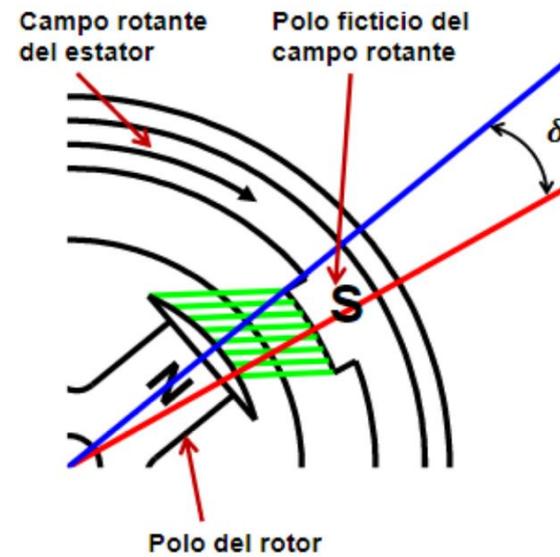
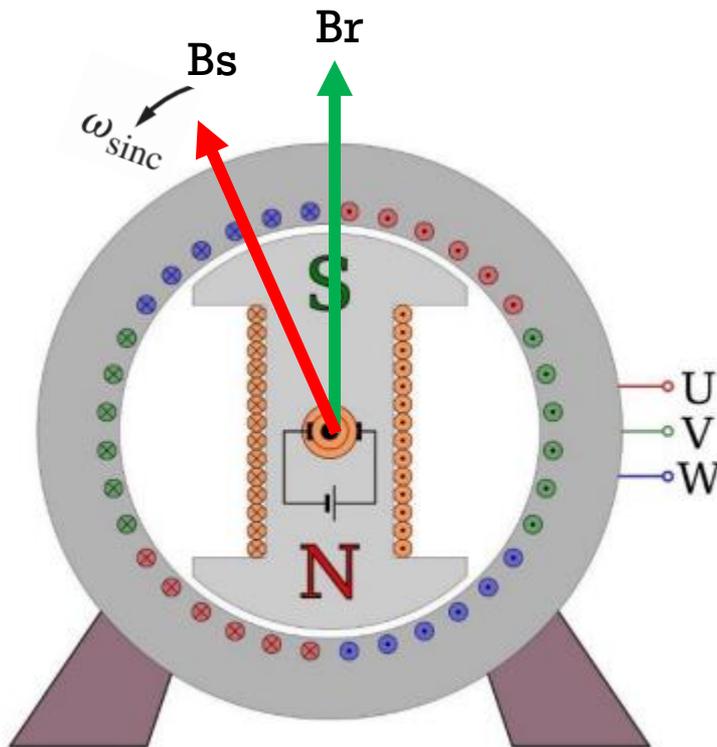
2 polos ficticios en el estator

4 polos ficticios en el estator



# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Hay dos campos magnéticos presentes en la máquina y el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo del estator, igual que dos imanes tenderán a alinearse si se colocan uno cerca del otro. Debido a que el campo magnético del estator gira, el campo magnético del rotor (y el rotor mismo) tratará constantemente de alcanzarlo.



# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La Excitatriz alimenta al rotor con C.C.

El Rotor crea un campo magnético estacionario uniforme  $B_r$

El estator es alimentado con C.A. produciendo un campo rotante  $B_s$

El rotor se hace girar a  $N$  (rpm), velocidad de sincronismo

El campo del rotor gira a la misma velocidad del campo rotante del estator. Se enganchan

Los polos reales del rotor interactúan con los polos ficticios del estator y producen fuerzas tangenciales, par de fuerza en sentido de rotación

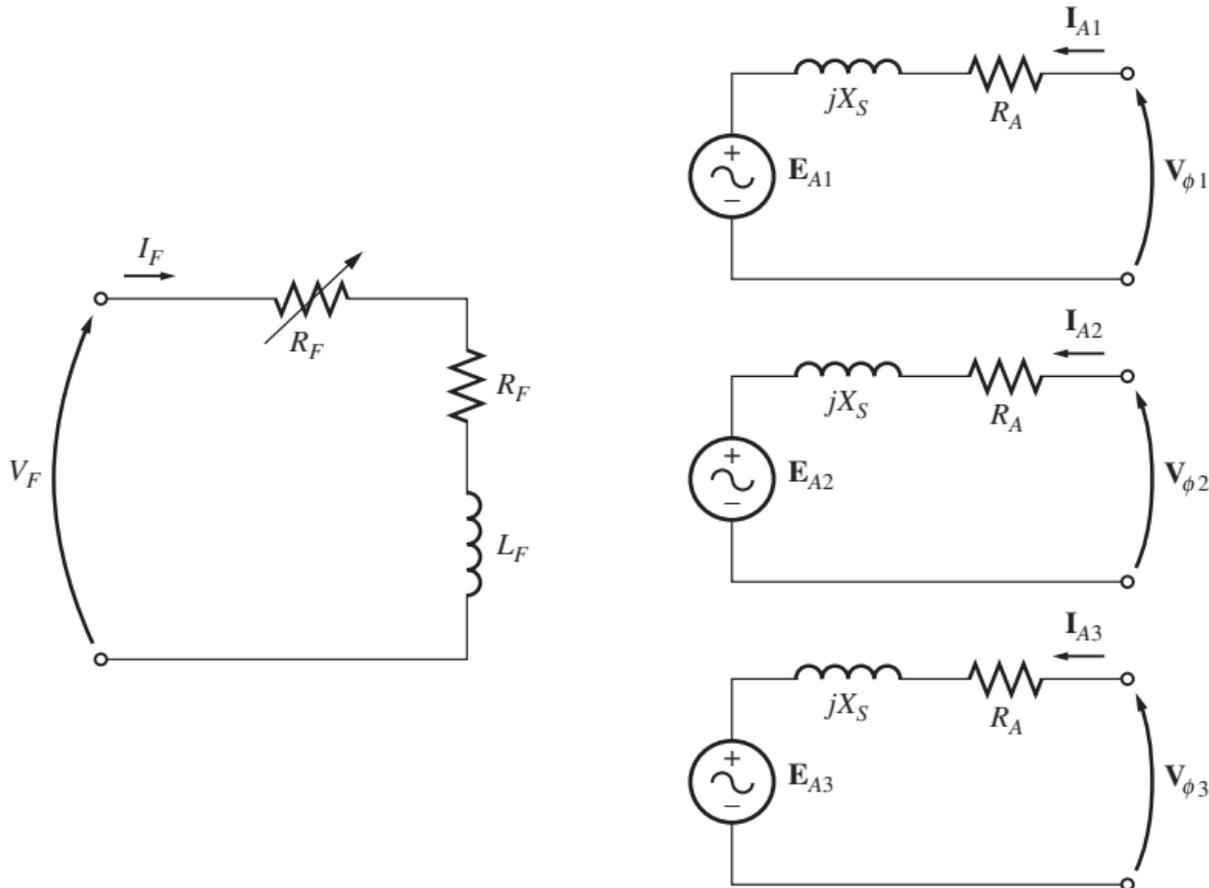
# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- EN ESTAS CONDICIONES EL ROTOR SIGUE AL CAMPO ROTANTE
- SI SE ATRASA EXAGERADAMENTE, EL VINCULO DASAPARECE Y EL MOTOR SALE DE SINCRONISMO
- EL VINCULO ES ELASTICO PERO UNA VEZ ROTO EL ROTOR ES INCAPAZ DE ALCANZAR LA VELOCIDAD DE SINCRONISMO NUEVAMENTE
- EL LIMITE DE ESTABILIDAD ES MARCADO POR UN ANGULO MENOR A  $90^\circ$  ELECTRICOS ( $\delta < 90^\circ$ )
- AL GIRAR LOS POLOS SE PRODUCE UNA FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ ( $f_{cem}$ )



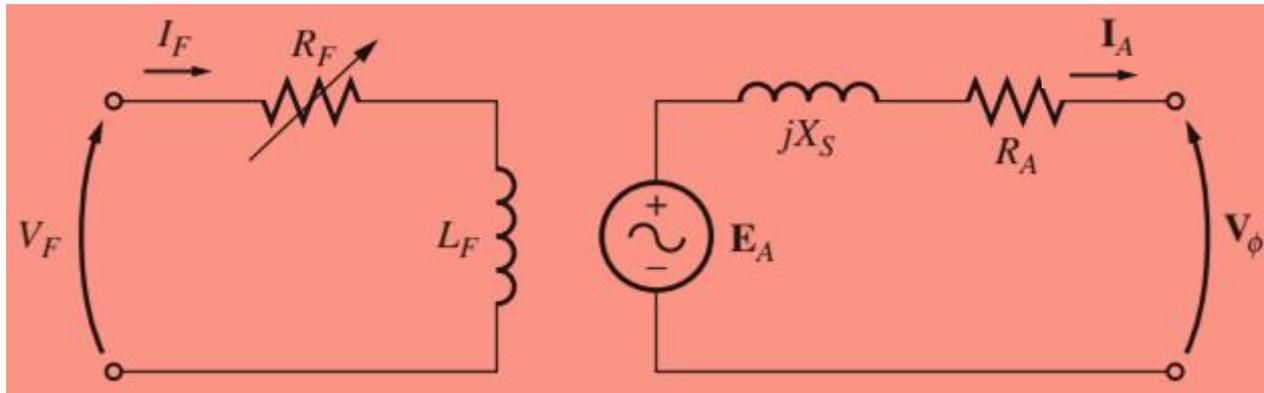
# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente Completo del motor sincrónico

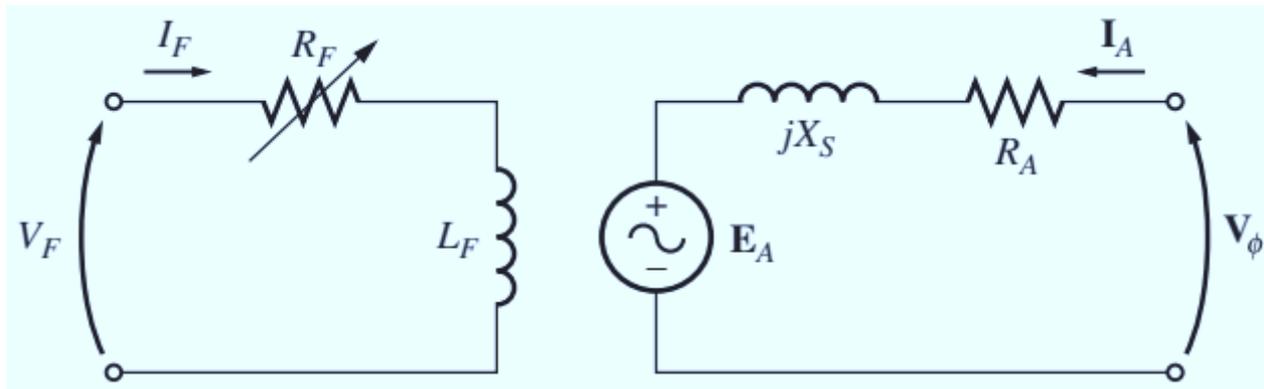


# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente por fase del Generador

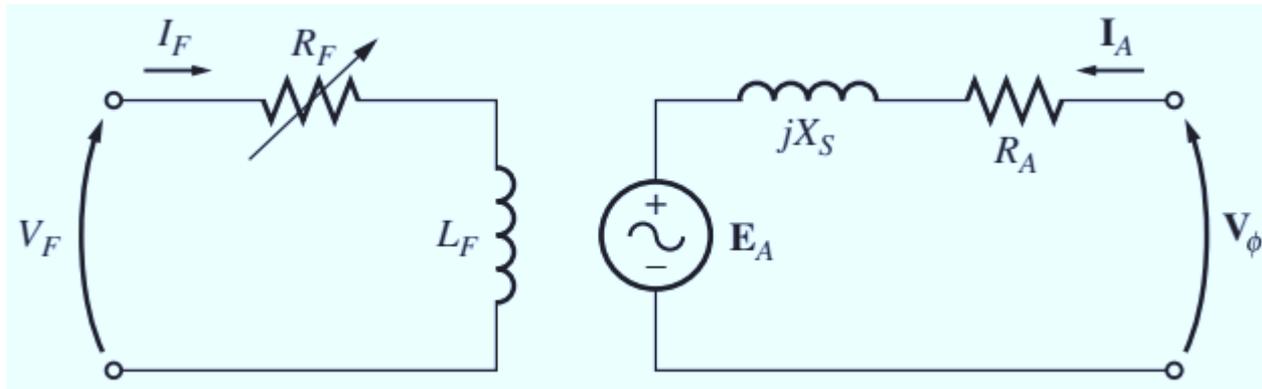


- Circuito Equivalente por fase del Motor



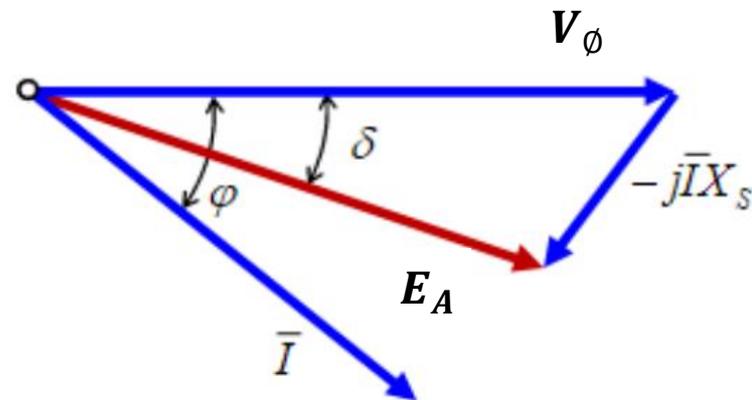
# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente por fase resultante



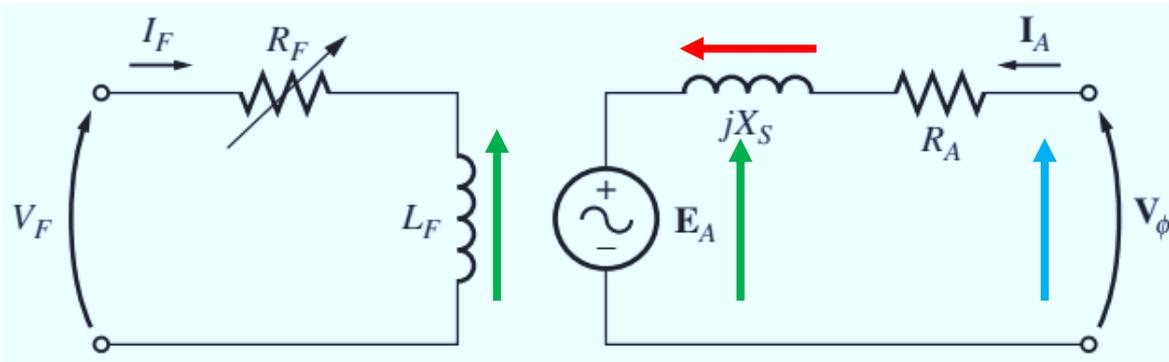
$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + jX_S \mathbf{I}_A + R_A \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi - jX_S \mathbf{I}_A - R_A \mathbf{I}_A$$



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

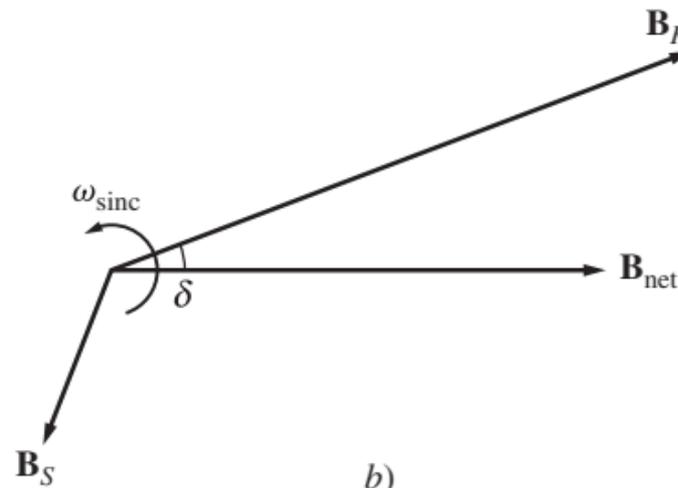
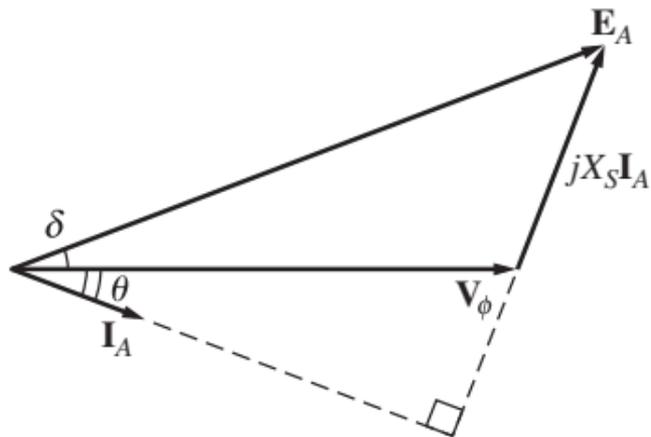
## ■ Circuito Equivalente por fase resultante



$E_A = f(B_R)$

$V_\phi = f(B_{net})$

$E_{Estator} = -jX_S \cdot I_A = f(B_{net})$



b)



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

## ■ Curva característica par-velocidad

Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante.

Es normal que estén conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales. Esto quiere decir que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán constantes sin importar la cantidad de potencia que consuma el motor.

La velocidad de rotación del motor está asociada a la tasa de rotación de los campos magnéticos, y la tasa de rotación de los campos magnéticos aplicados está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, por lo que la velocidad del motor síncrono será constante sin que importe la carga.



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Curva característica par-velocidad

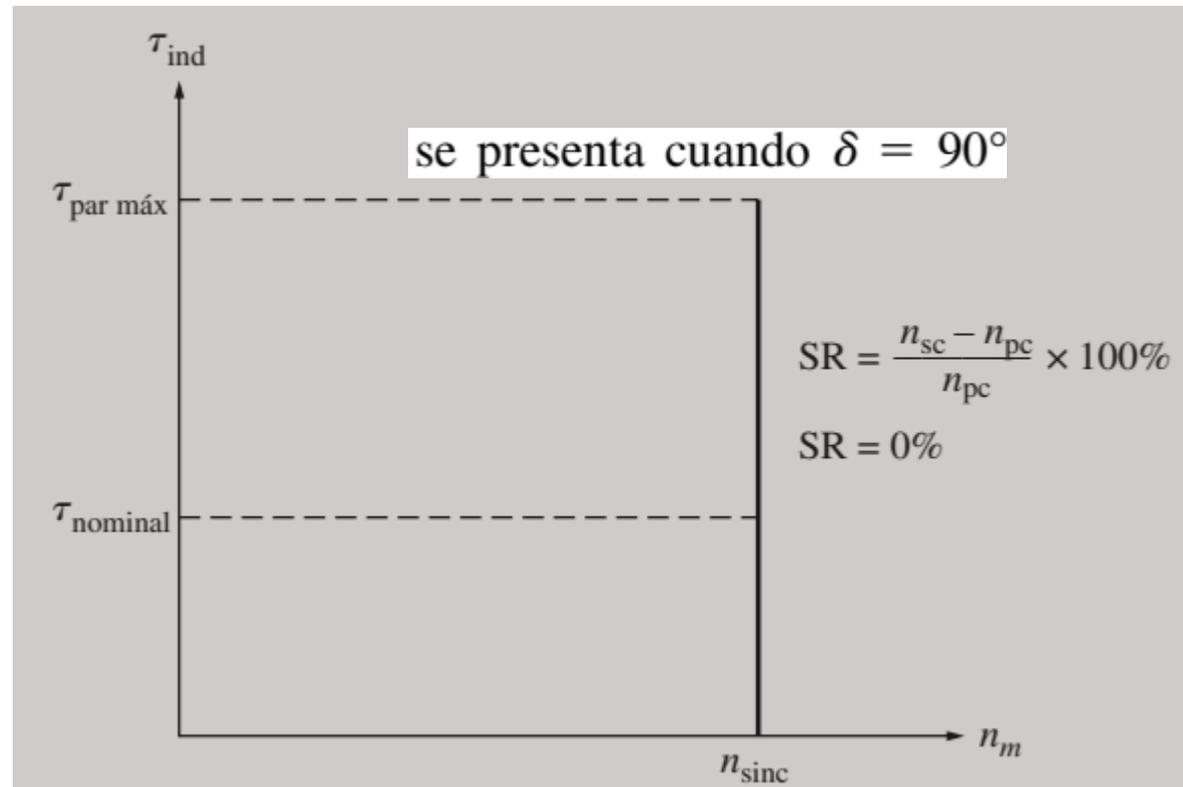
$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}}$$

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \mathbf{B}_{\text{net}} \text{sen } \delta$$

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_{\phi} E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S}$$

Mientras más grande sea la corriente de campo (y en consecuencia, EA) más grande será el par máximo del motor

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{3V_{\phi} E_A}{\omega_m X_S}$$

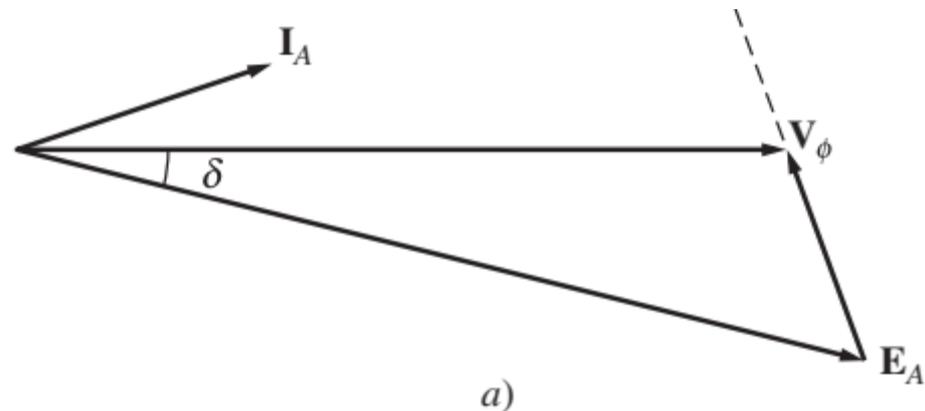


# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos

## ¿Qué pasa si la carga en un motor síncrono cambia?

Motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en adelanto



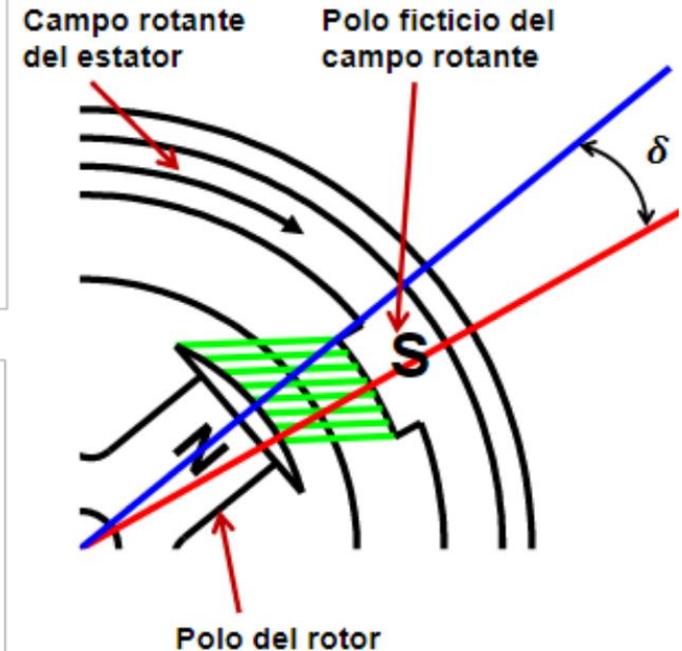
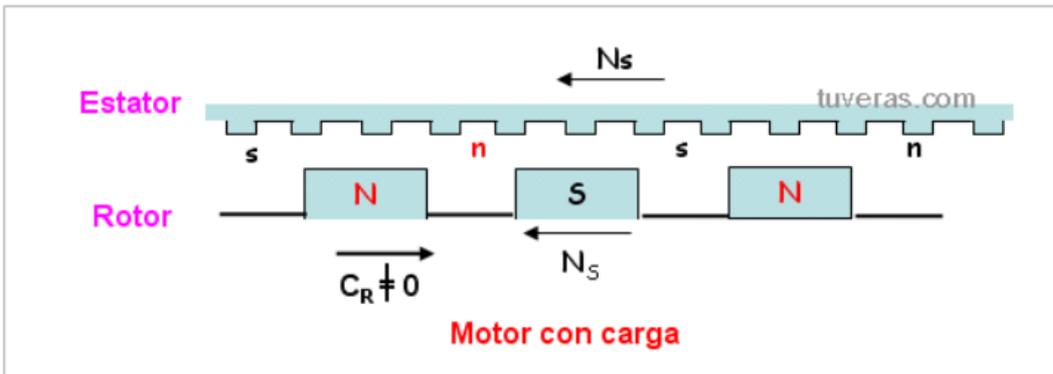
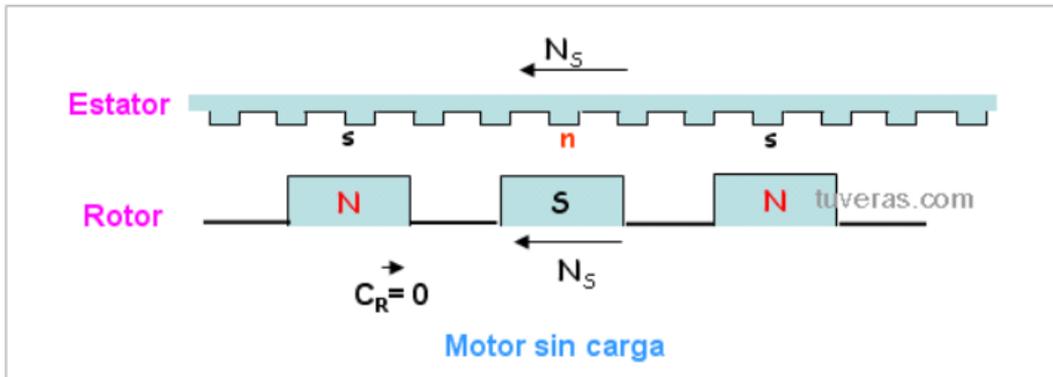
El voltaje interno generado  $E_A$  sólo depende de la corriente de campo en la máquina y de la velocidad de ésta. La velocidad está restringida a ser constante en función de la fuente de potencia de entrada y, debido a que no se ha tocado el circuito de campo, también es constante la corriente de campo. Por lo tanto,  $|E_A|$  debe ser constante aun cuando la carga varíe.



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos

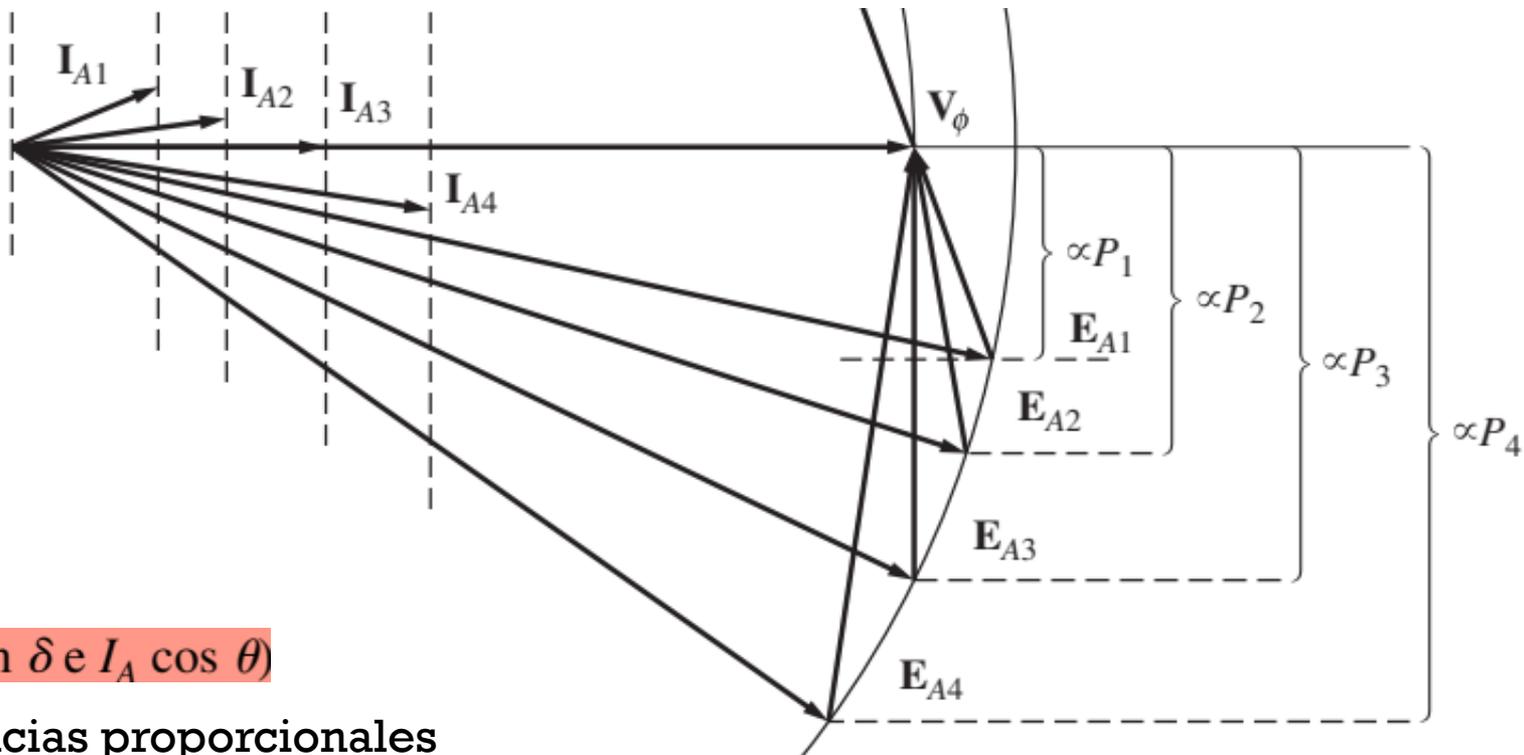
**¿Qué pasa si la carga en un motor síncrono cambia?**



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos

**¿Qué pasa si la carga en un motor síncrono cambia?**



$(E_A \sin \delta \text{ e } I_A \cos \theta)$

Distancias proporcionales a la potencia

$|E_A|$  debe ser constante aun cuando la carga varíe

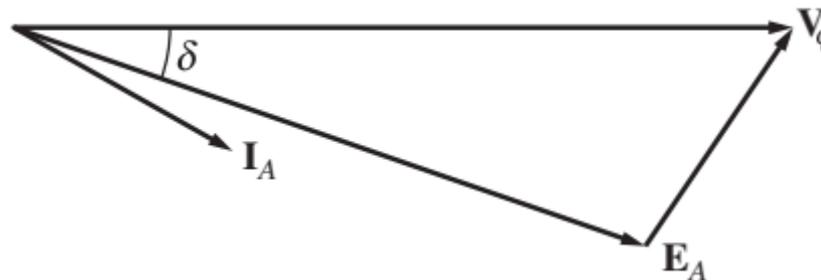


# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Efecto de los cambios de la corriente de campo

**¿Qué efecto tiene un cambio de la corriente de campo en un motor síncrono?**

Motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en retraso



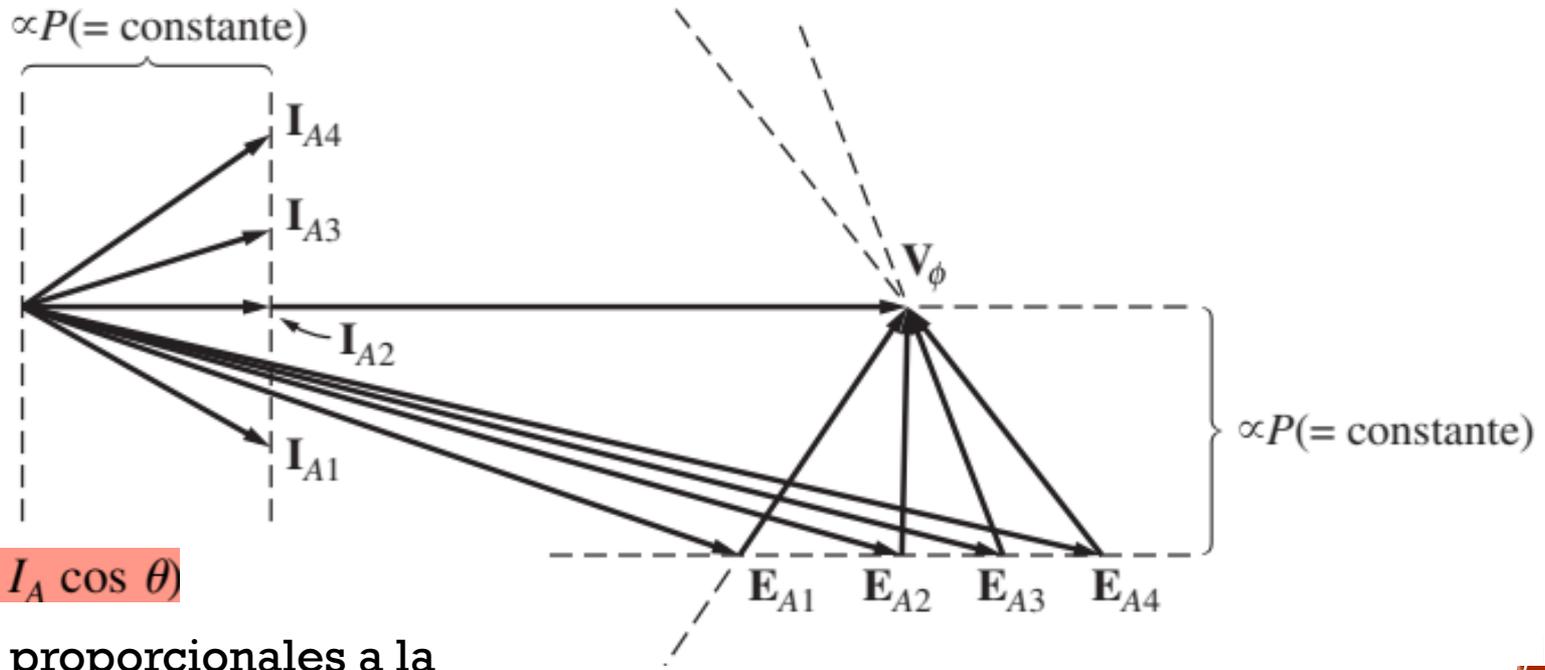
Un incremento en la corriente de campo incrementa la magnitud de  $E_A$ , pero no afecta la potencia real que suministra el motor. La potencia que suministra el motor sólo cambia cuando cambia el par en la carga del eje. Puesto que un cambio en  $I_F$  no afecta la velocidad del eje y debido a que la carga en el eje no cambia, la potencia real suministrada tampoco lo hace.



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- Efecto de los cambios de la corriente de campo

¿Qué efecto tiene un cambio de la corriente de campo en un motor síncrono?

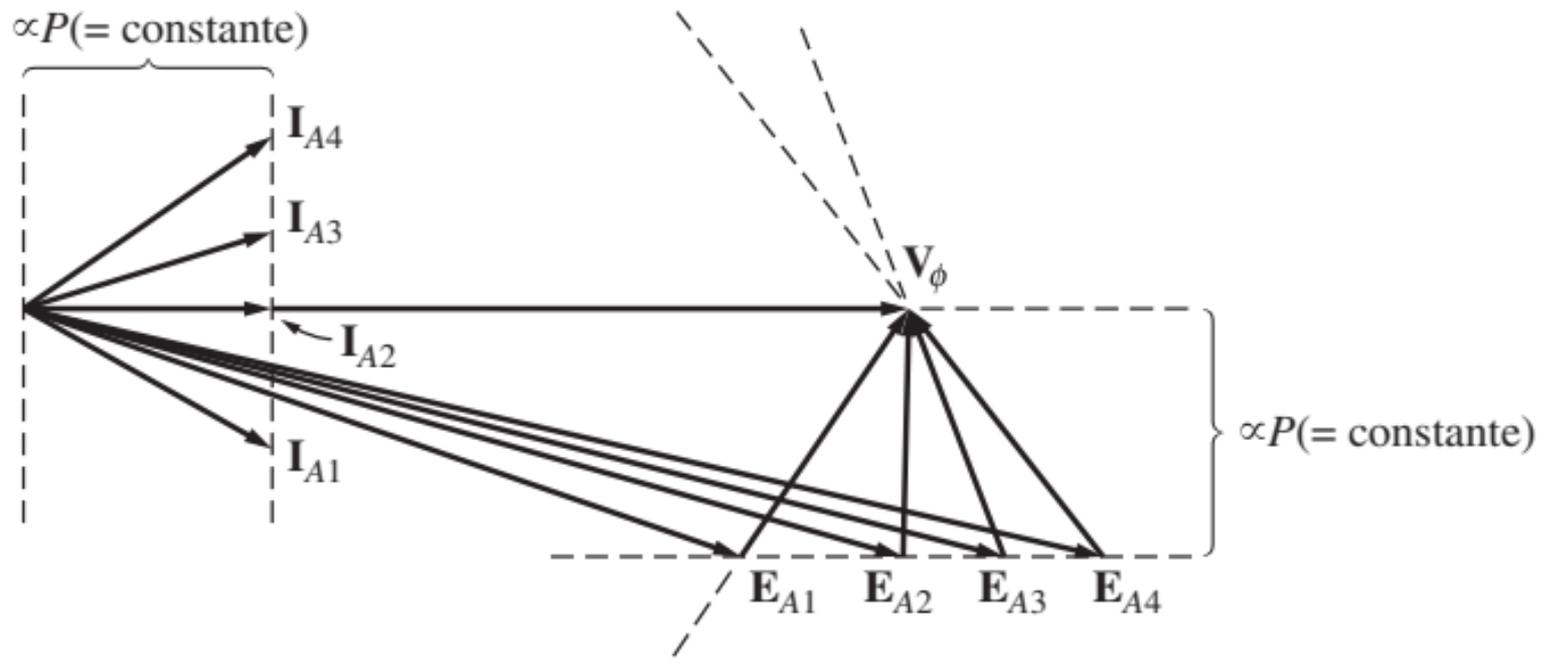


Distancias proporcionales a la potencia son constantes



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

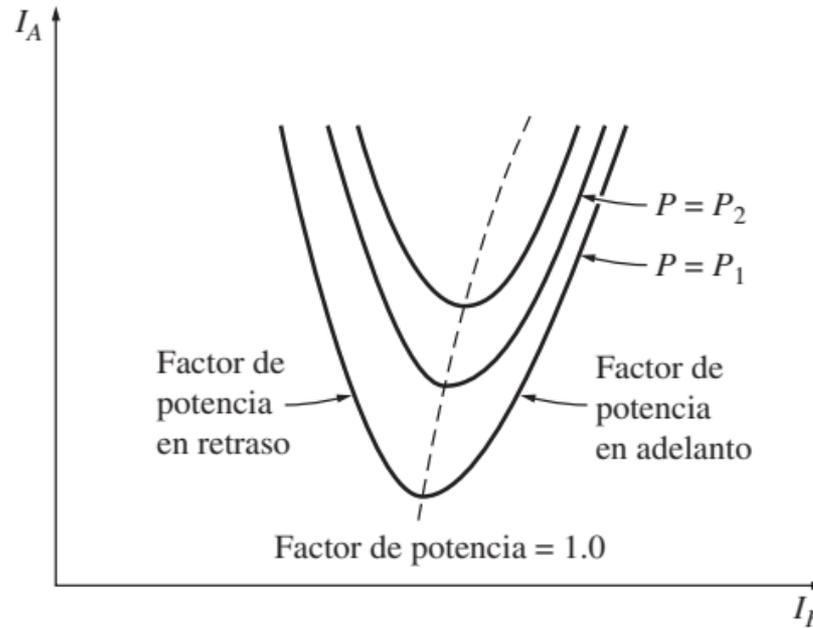
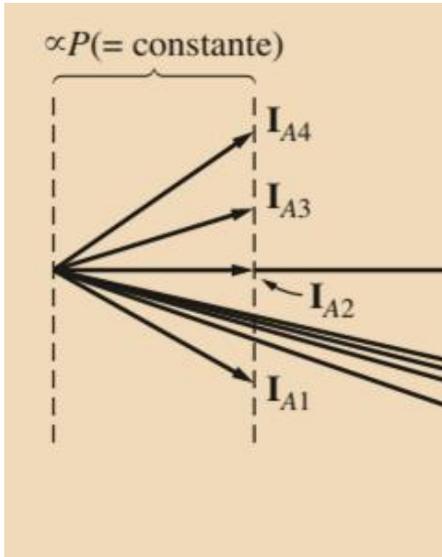
- Efecto de los cambios de la corriente de campo



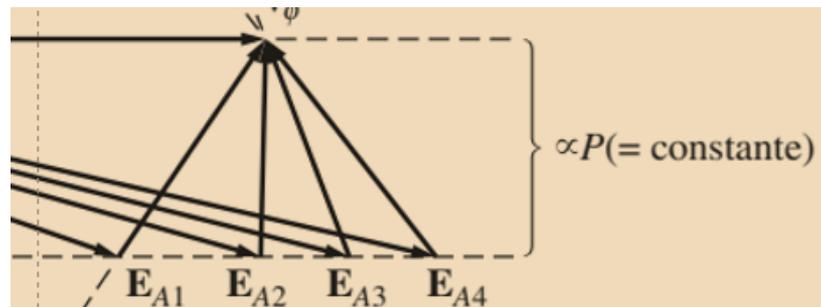
Nótese que conforme se incrementa el valor de  $E_A$ , la magnitud de la corriente en el inducido  $I_A$  primero disminuye y luego se incrementa



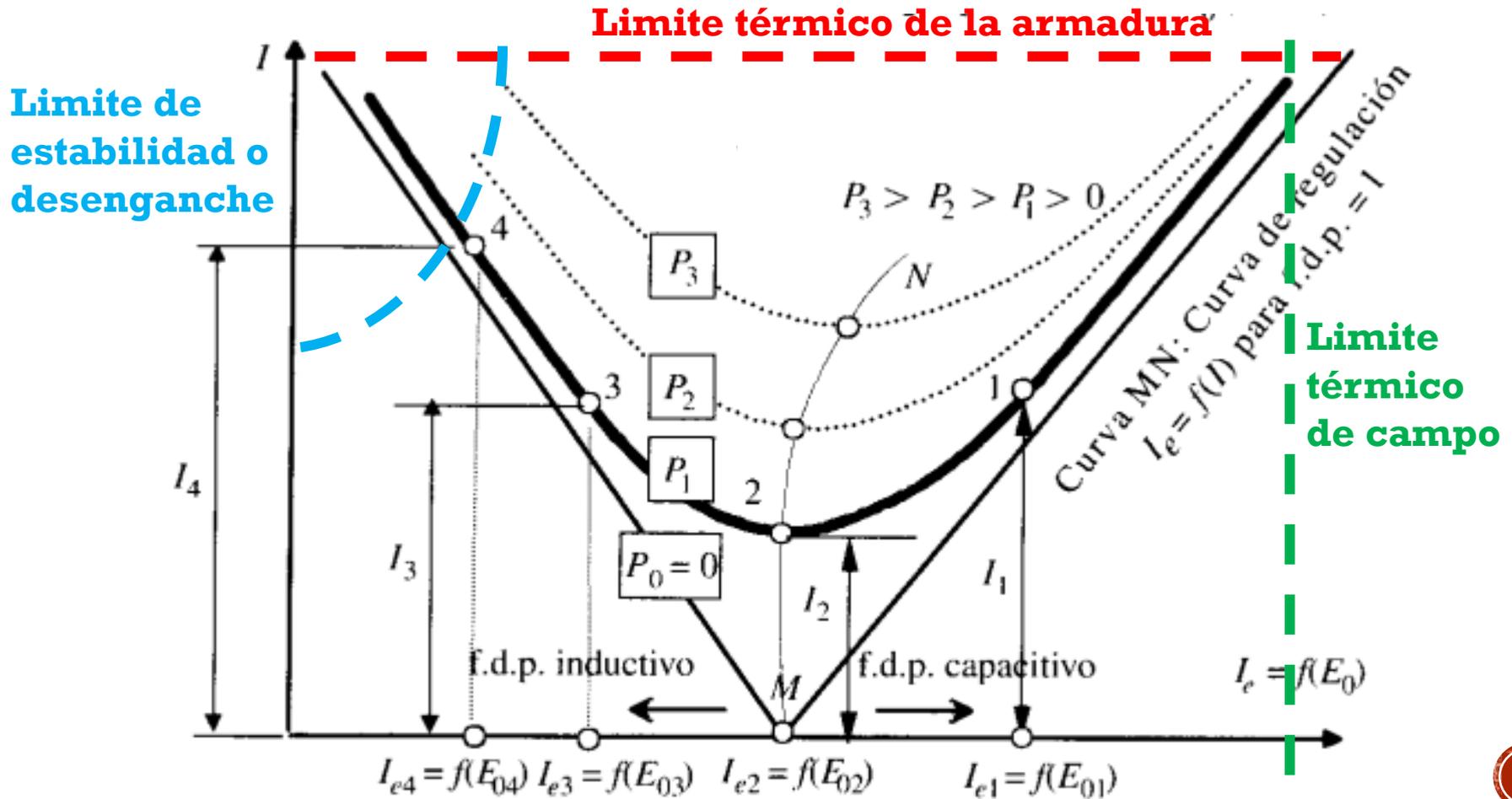
# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO



Curvas en V de un motor síncrono.  
**Curva de "V" de MORDEY**



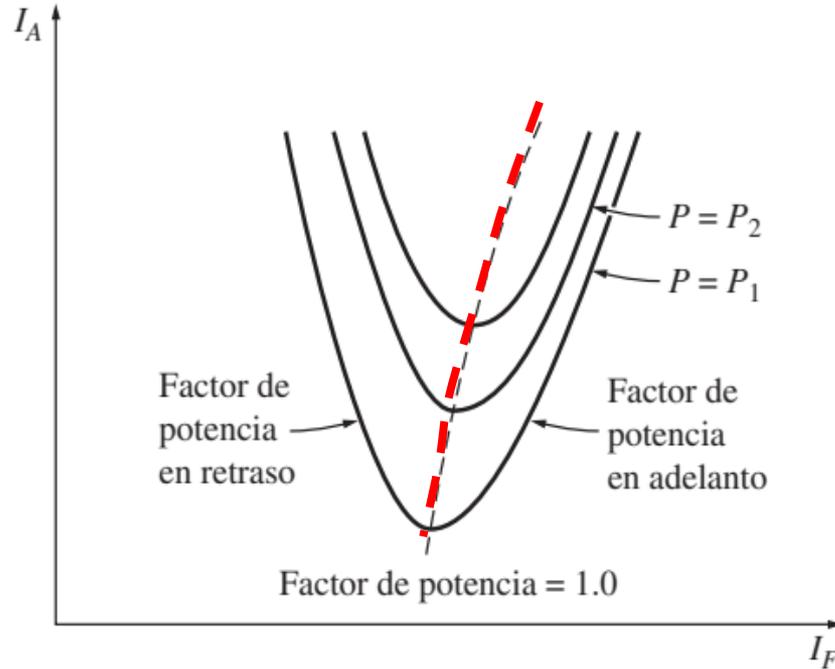
# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO



# OPERACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

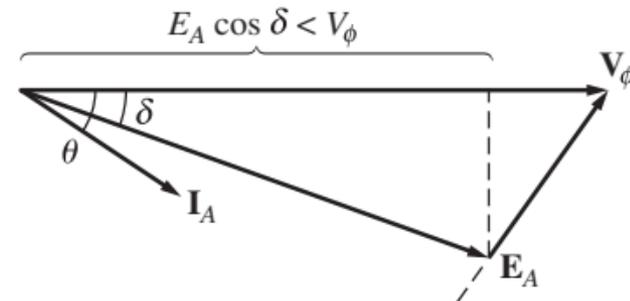
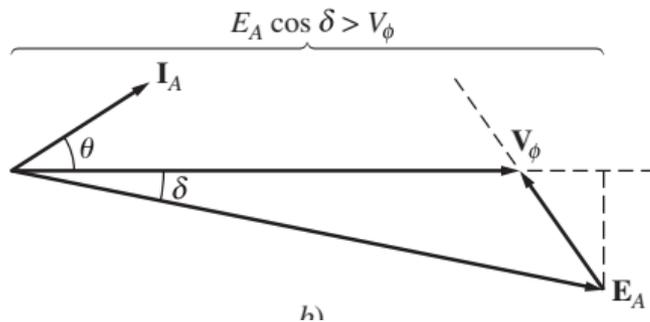
**Motor subexcitado  
INDUCTOR**

**$P < 0$  consume  $P_{act}$   
 $Q > 0$  consume  $Q_r$**



**Motor sobrexcitado  
CAPACITOR**

**$P < 0$  consume  $P_{act}$   
 $Q < 0$  suministra  $Q_r$**



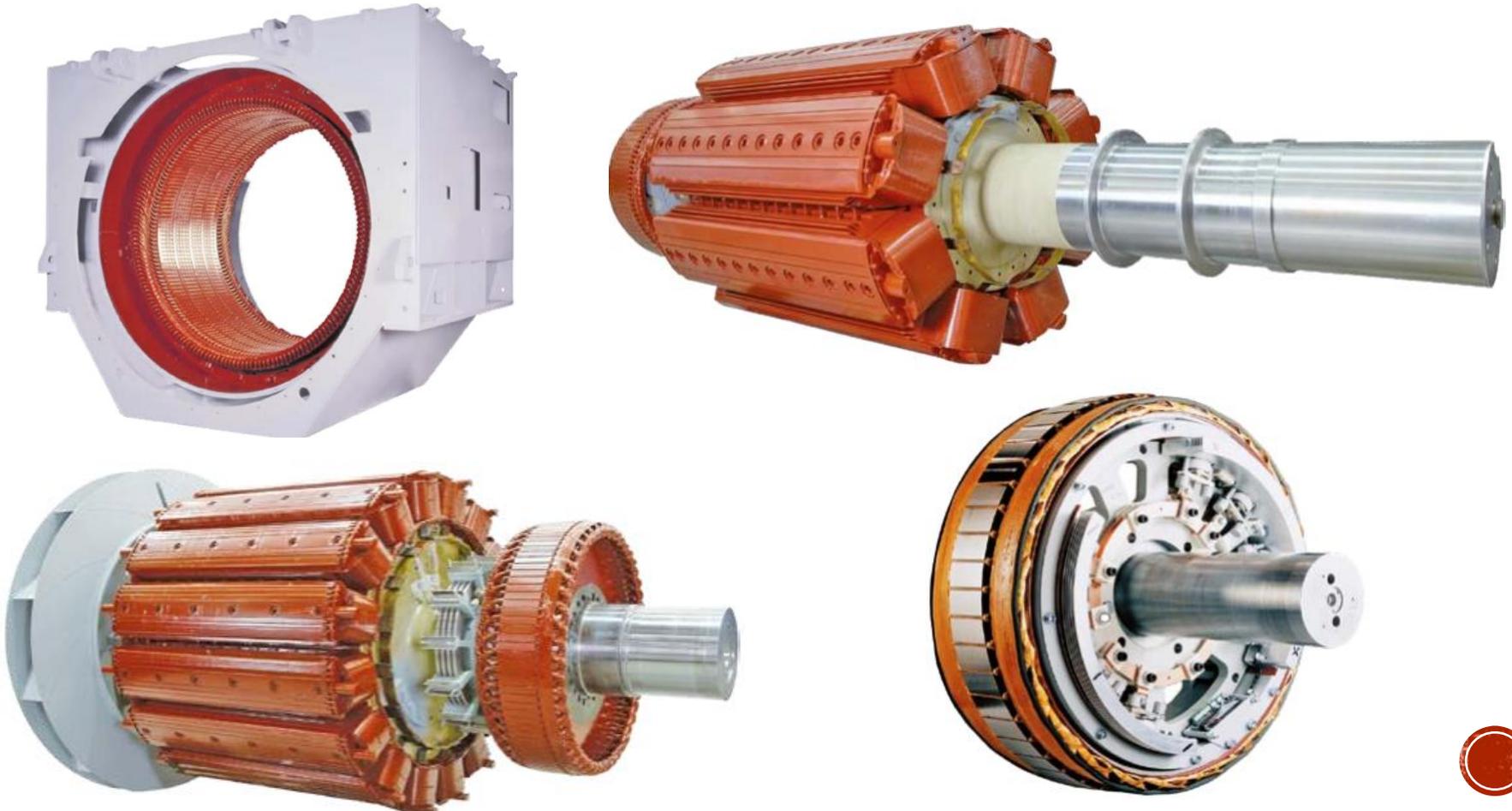
# ARRANQUE MOTORES SINCRONOS

- 1. **Reducir la velocidad del campo magnético del estator** a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semiciclo de la rotación del campo magnético. Este objetivo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.
- 2. Utilizar un **motor primario externo** para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagar o desconectar el motor principal para convertir la máquina síncrona en un motor.
- 3. Utilizar **devanados de amortiguamiento**. A continuación se explicará la función de los devanados de amortiguamiento y su utilización en el arranque de un motor.



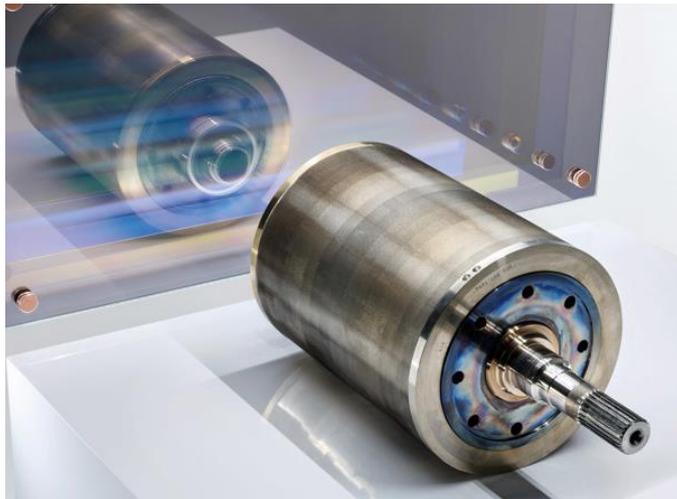
# TIPOS DE MOTORES SINCRONOS

- **Motor síncrono rotor bobinado**



# TIPOS DE MOTORES SINCRONOS

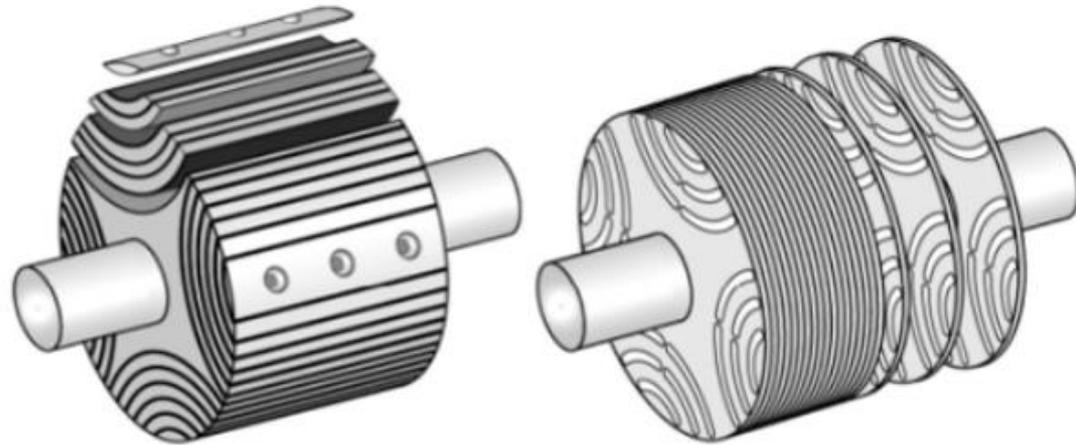
- **Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)** El rotor tiene imanes permanentes que se sincronizan con el campo magnético del estator.
- Ofrecen alta eficiencia y buen rendimiento, especialmente en aplicaciones de alta velocidad.



# TIPOS DE MOTORES SINCRONOS

## 2. Motor síncrono de reluctancia

- El rotor tiene zonas de alta y baja reluctancia. Gira tratando de alinearse con el campo magnético del estator, minimizando la reluctancia.
- Son conocidos por su simplicidad, pero el control y el arranque pueden ser más complejos



# MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

## **Bibliografía y material audiovisual:**

- Jesus Fraile Mora. Maquinas Eléctricas. 5ta edición 2003
- Maquinas Eléctricas II, Tema 4. 2018, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta
- Máquinas y Accionamientos Eléctricos (3M4) - Métodos de arranque. Característica mecánica de la carga
- <https://salamoisian.uva.es/asincrona/>

