



# EL 6000

# Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables

## Clase 5: PRINCIPIOS BASICOS DE MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

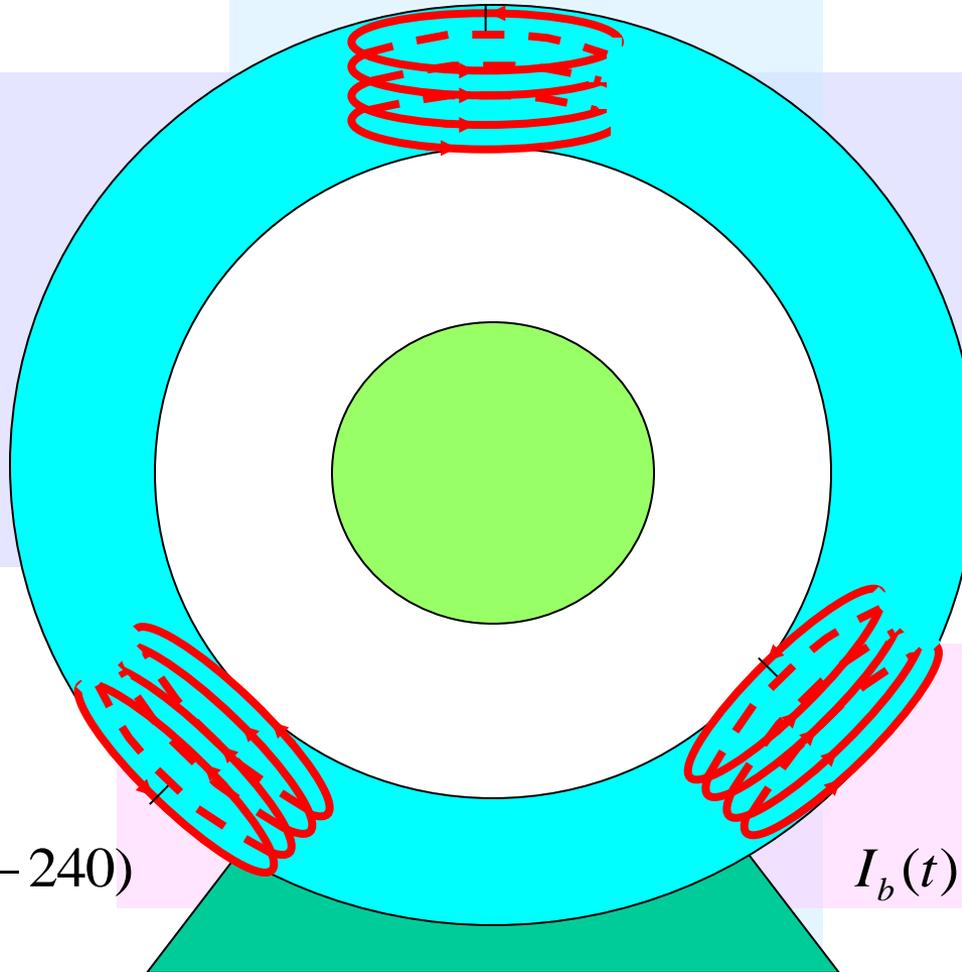
Luis Vargas  
AREA DE ENERGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA



# Principios de la Máquina de Inducción

**Estator**

$$I_a(t) = I_m \sin \omega_s t$$



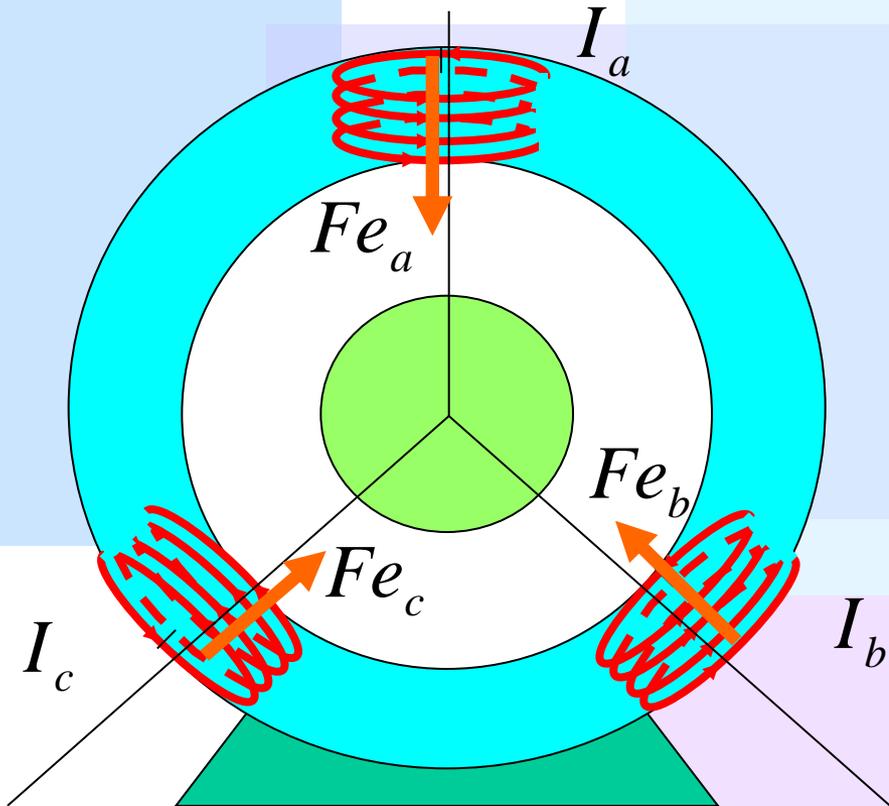
$$I_c(t) = I_m \sin(\omega_s t - 240)$$

$$I_b(t) = I_m \sin(\omega_s t - 120)$$



# Principio de Funcionamiento Estator

Cada enrollado origina un flujo y una fuerza magnetomotriz, dada por:



$$Fe_a = NI_a$$

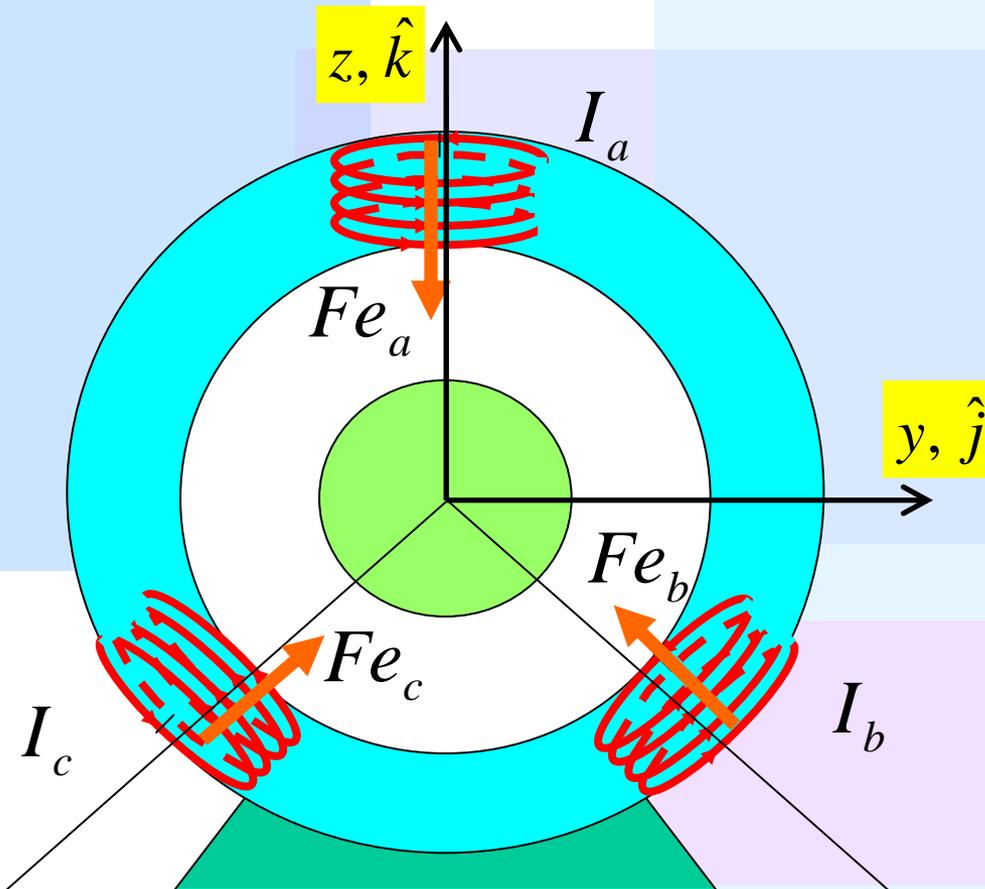
$$Fe_b = NI_b$$

$$Fe_c = NI_c$$



# Principios de la Máquina de Inducción

Cada enrollado origina un flujo y una fuerza magnetomotriz, dada por:



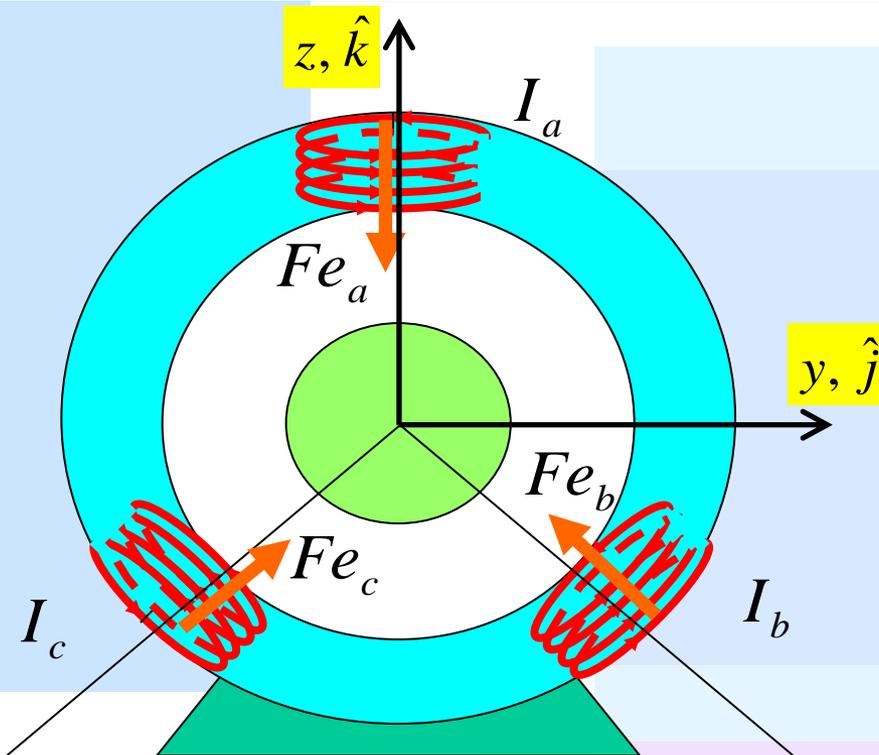
$$Fe_a = NI_a$$

$$Fe_b = NI_b$$

$$Fe_c = NI_c$$



# Principios de la Máquina de Inducción



Tenemos:  $I_a(t) = I_m \sin \omega_s t,$

$I_b(t) = I_m \sin(\omega_s t - 120),$

$I_c(t) = I_m \sin(\omega_s t - 240)$

llamando  $F_m = N \cdot I_{max}$

La fuerza electromotriz proyectada en ambos ejes es

$$F_{e_y} = F_m [-\sin(\omega_s t - 120) \cos 30 + \sin(\omega_s t - 240) \cos 30]$$

$$F_{e_z} = F_m [-\sin \omega_s t + \sin(\omega_s t - 120) \sin 30 + \sin(\omega_s t - 240) \cos 30]$$



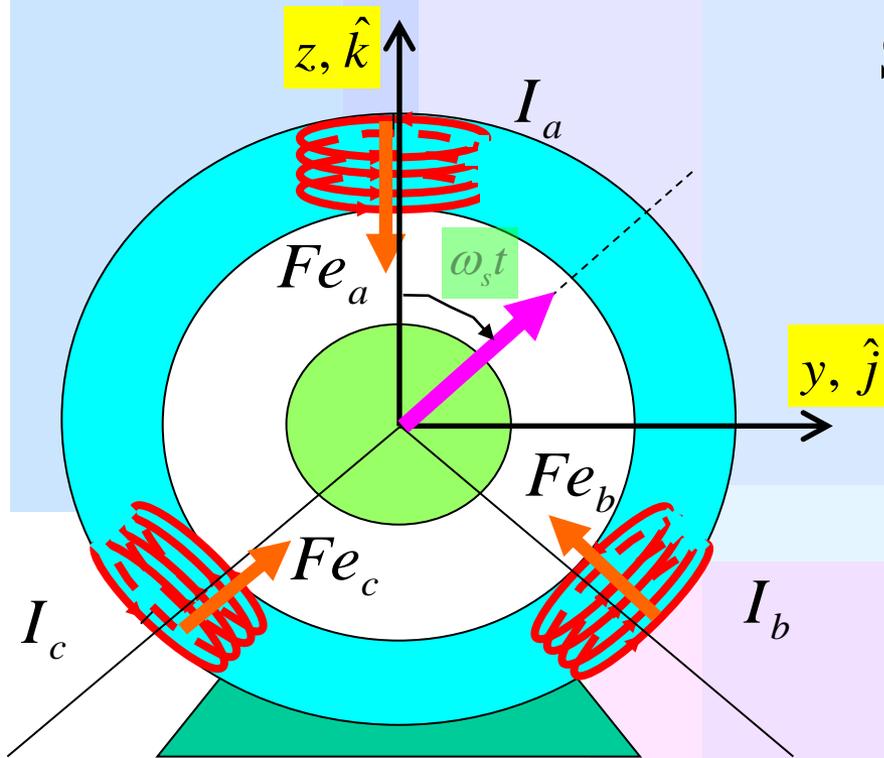
# Principios de la Máquina de Inducción

Recordando que  $\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$

Se llega a una expresión de la forma:

$$Fe_y = \frac{3}{2} F_m \sin(\omega_s t)$$

$$Fe_z = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega_s t)$$

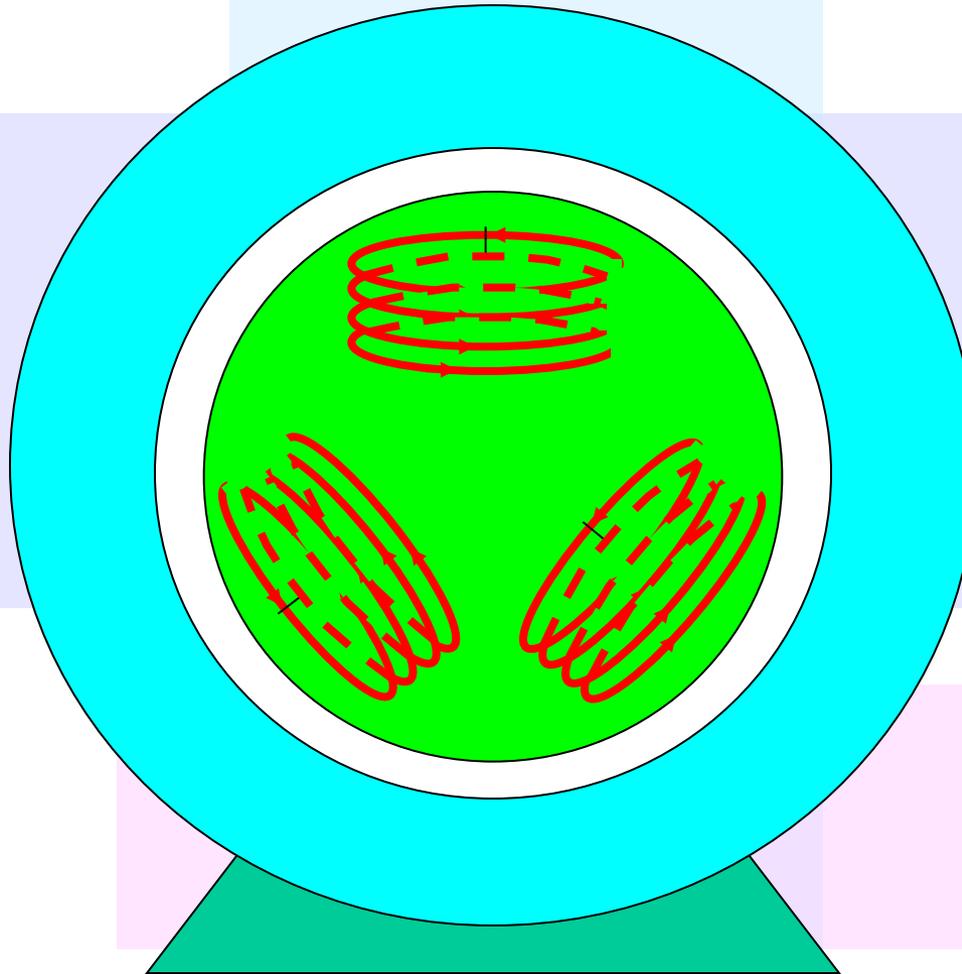


$F_e$  se mueve a una velocidad  $\dot{\theta} = \omega$ ,  
llamada *velocidad síncrona* o  
*velocidad sincrónica* ( $\omega_s$ ).



# Principios de la Máquina de Inducción

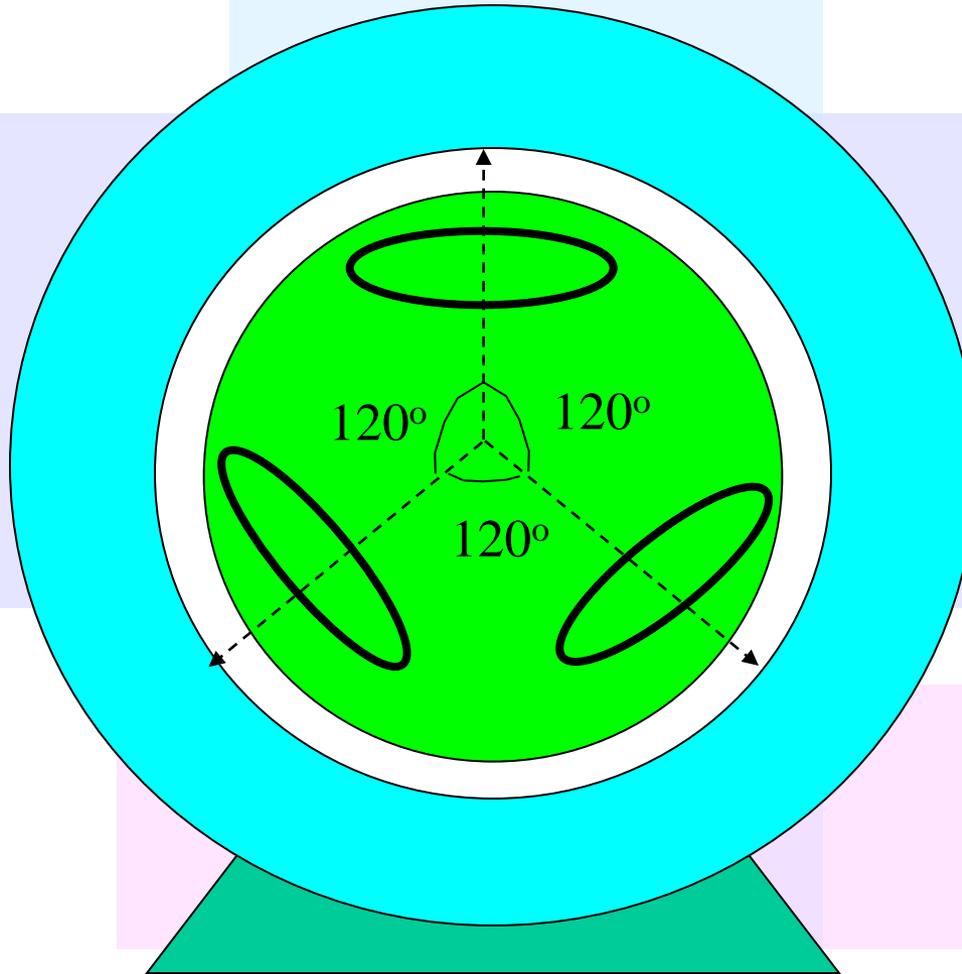
## Rotor





# Principios de la Máquina de Inducción

## Rotor

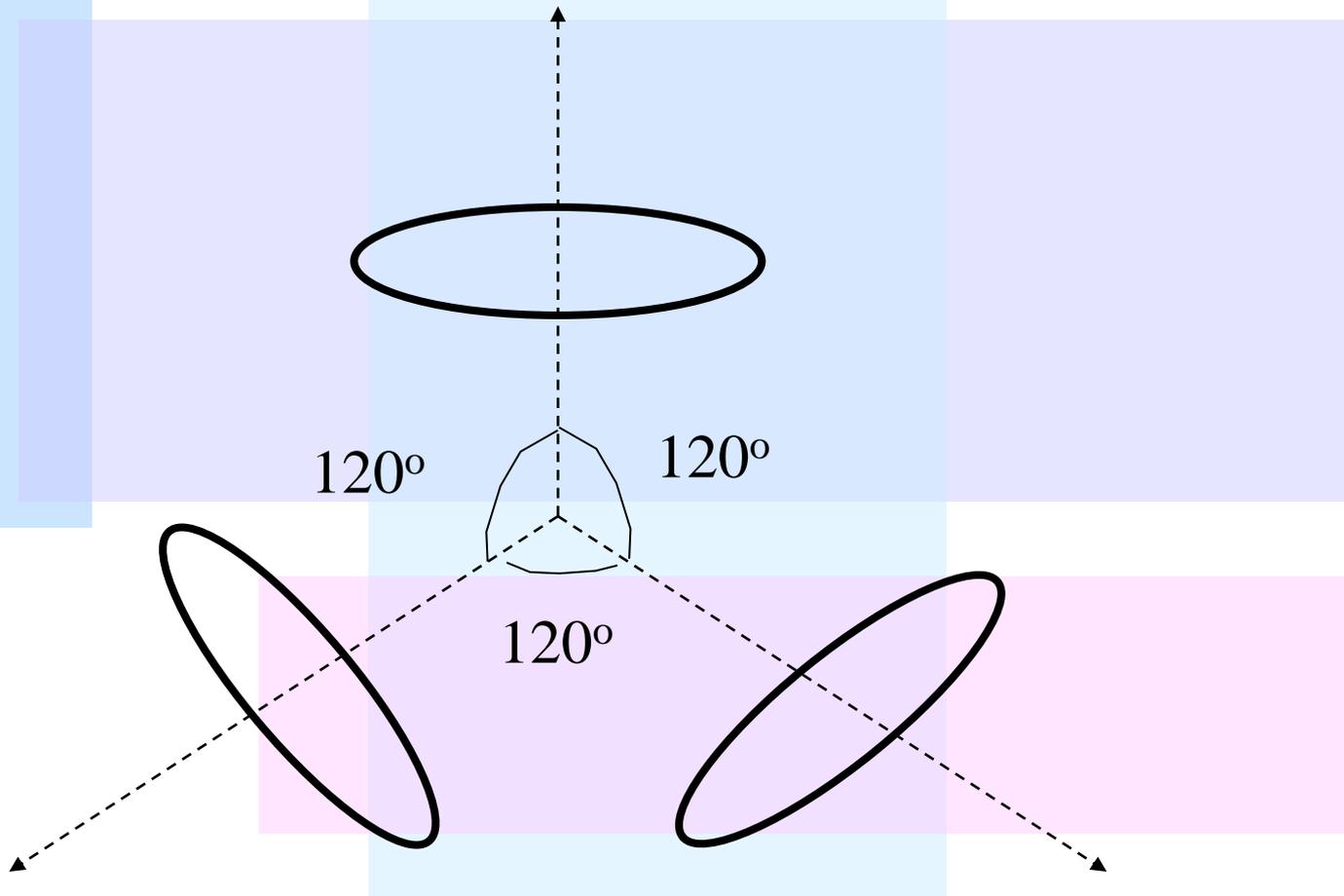




# Principios de la Máquina de Inducción

## Rotor

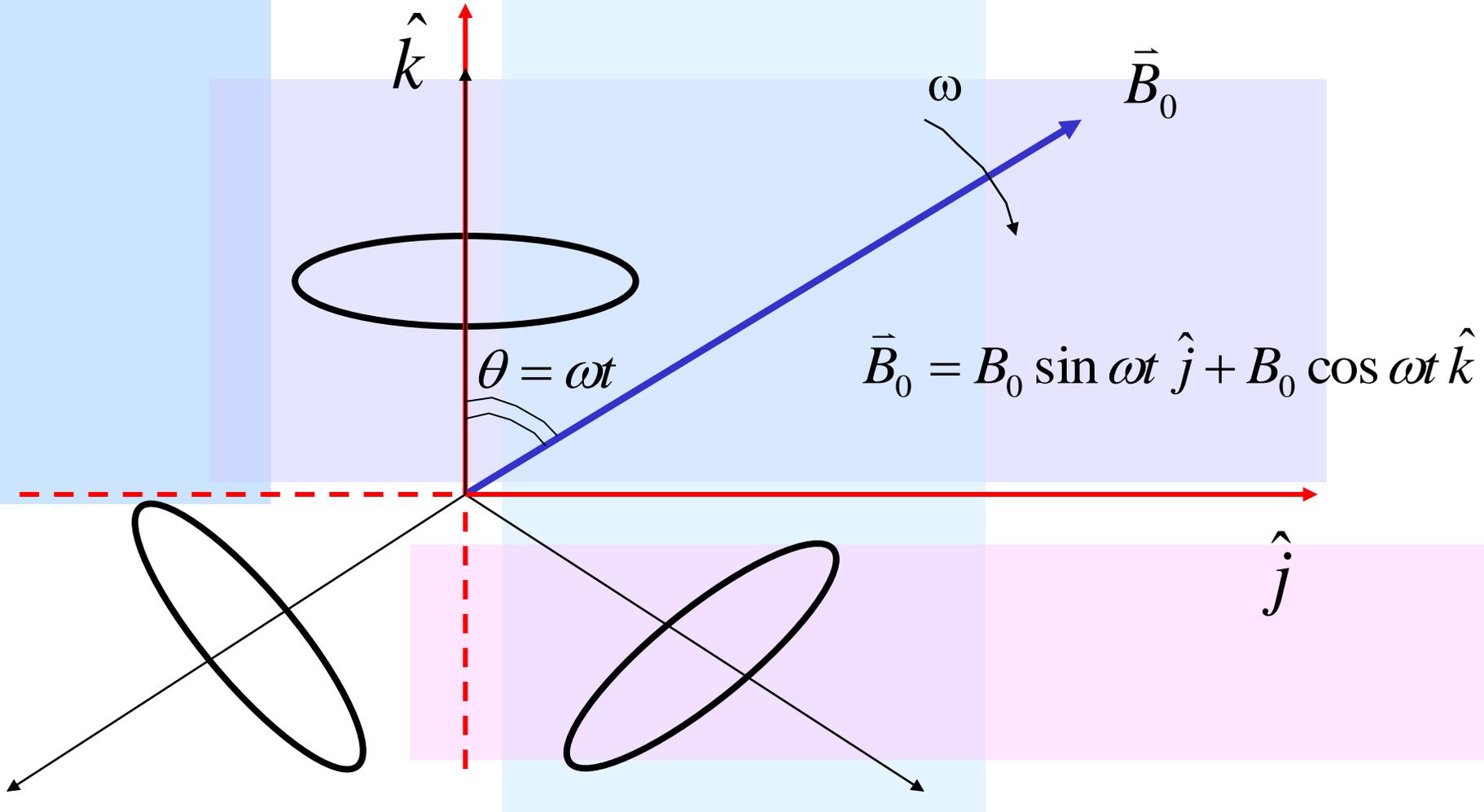
Sistema de tres espiras espaciadas en 120 grados





# Principios de la Máquina de Inducción

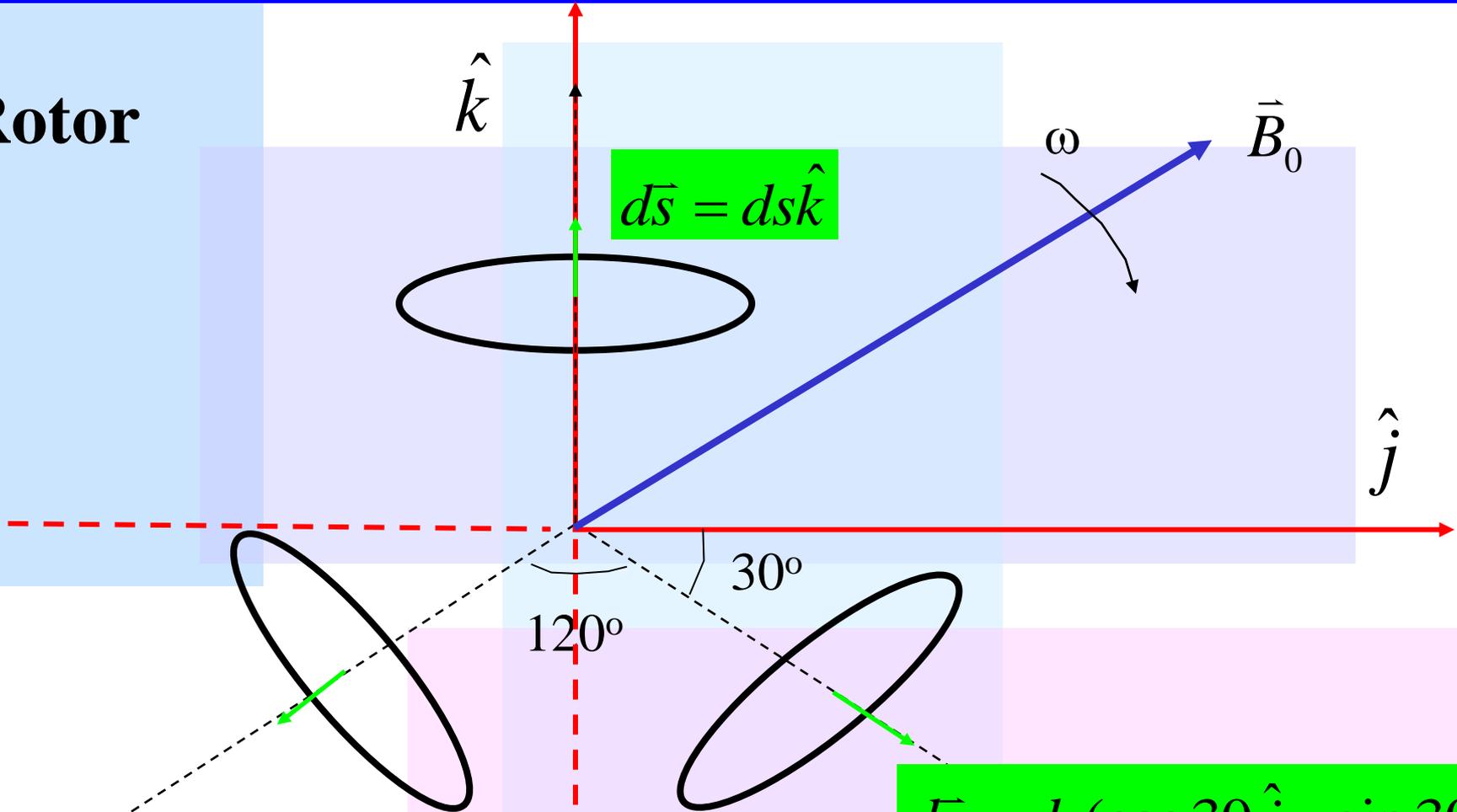
Campo magnético girando a velocidad angular constante  $\omega$





# Principios de la Máquina de Inducción

Rotor



$$d\vec{s} = ds\hat{k}$$

$$d\vec{s} = ds(\cos 30\hat{j} - \sin 30\hat{k})$$

$$d\vec{s} = ds(-\cos 30\hat{j} - \sin 30\hat{k})$$

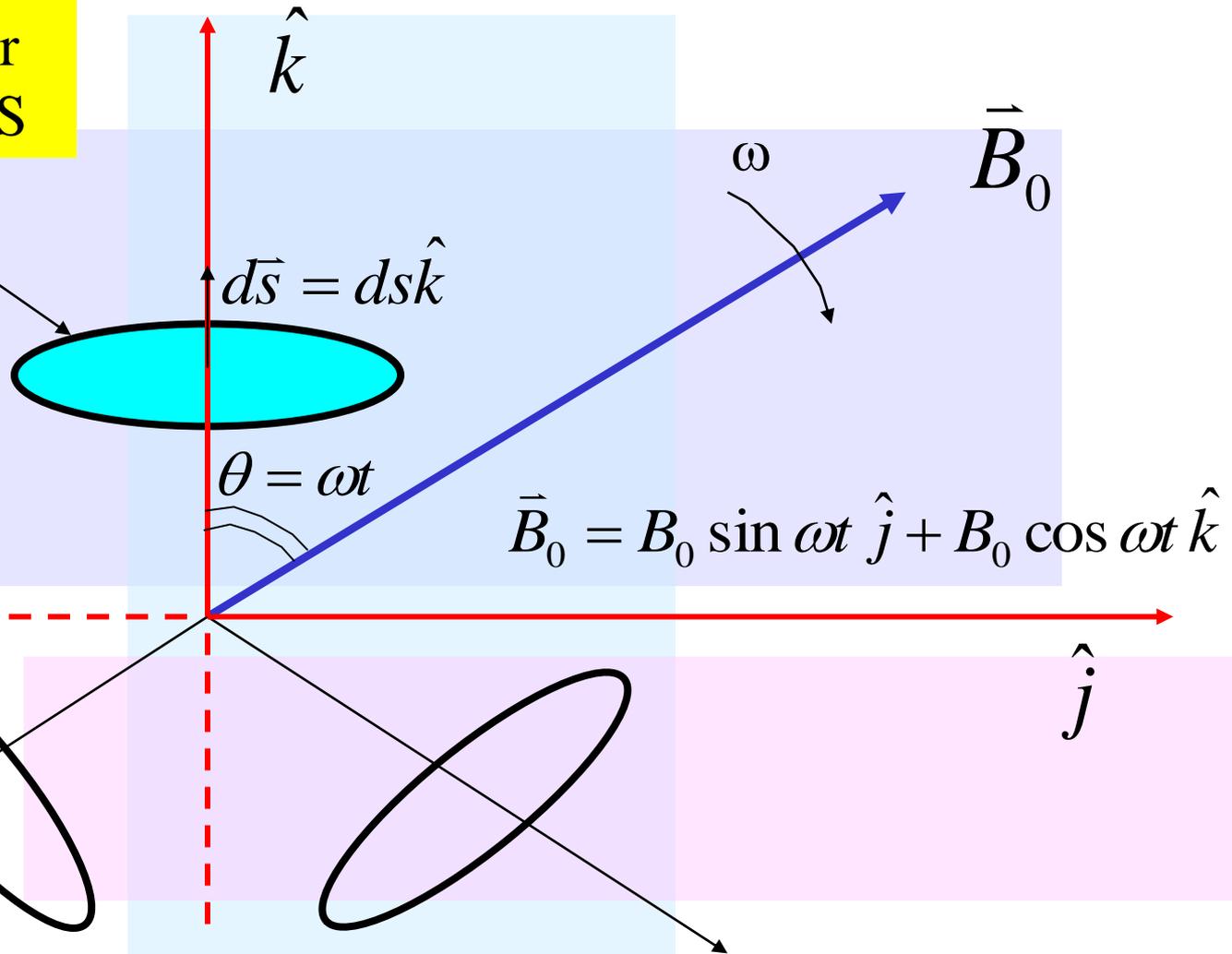


# Principios de la Máquina de Inducción

Flujo enlazado por  
espira de sección  $S$

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$\Phi_a = SB_0 \cos \omega t$$



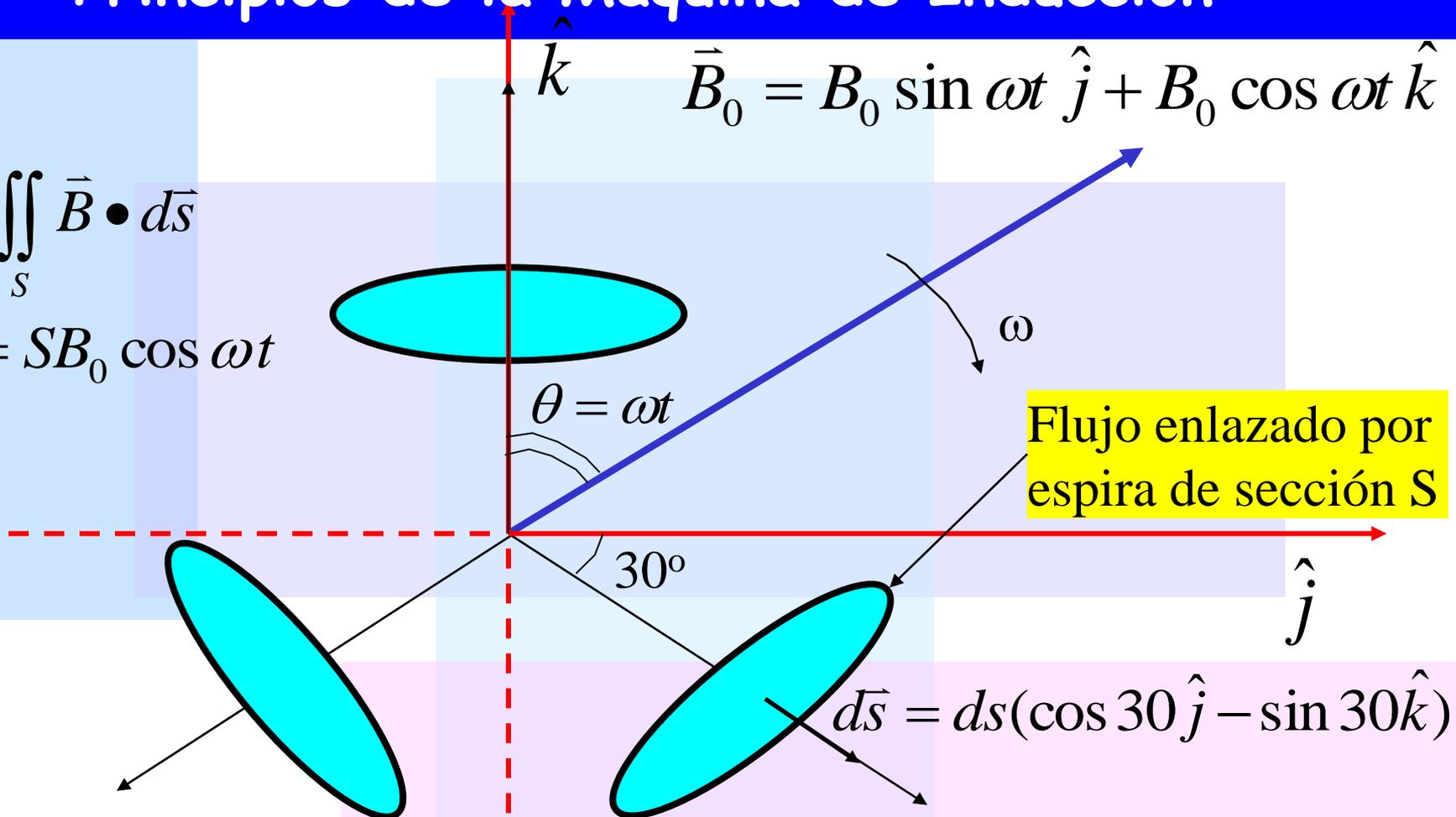


# Principios de la Máquina de Inducción

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

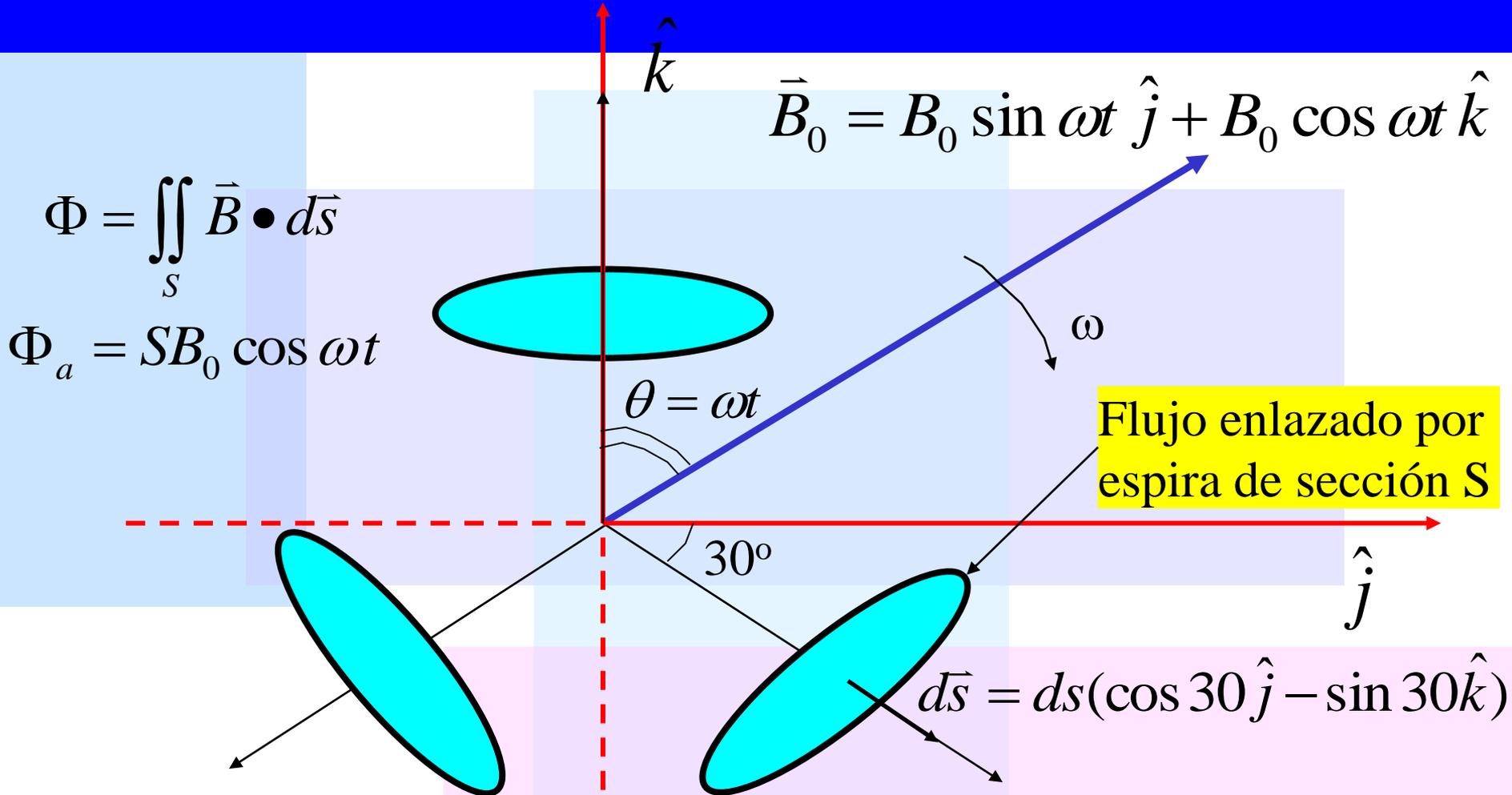
$$\Phi_a = SB_0 \cos \omega t$$

$$\vec{B}_0 = B_0 \sin \omega t \hat{j} + B_0 \cos \omega t \hat{k}$$



$$\vec{B} \cdot d\vec{s} = (B_0 \sin \omega t \hat{j} + B_0 \cos \omega t \hat{k}) \cdot ds(\cos 30 \hat{j} - \sin 30 \hat{k})$$

$$\vec{B} \cdot d\vec{s} = B_0 \sin \omega t ds \cos 30 - B_0 \cos \omega t ds \sin 30$$



$$\vec{B} \cdot d\vec{s} = B_0 ds \sin(\omega t - 30) = B_0 ds \cos(\omega t - 120)$$



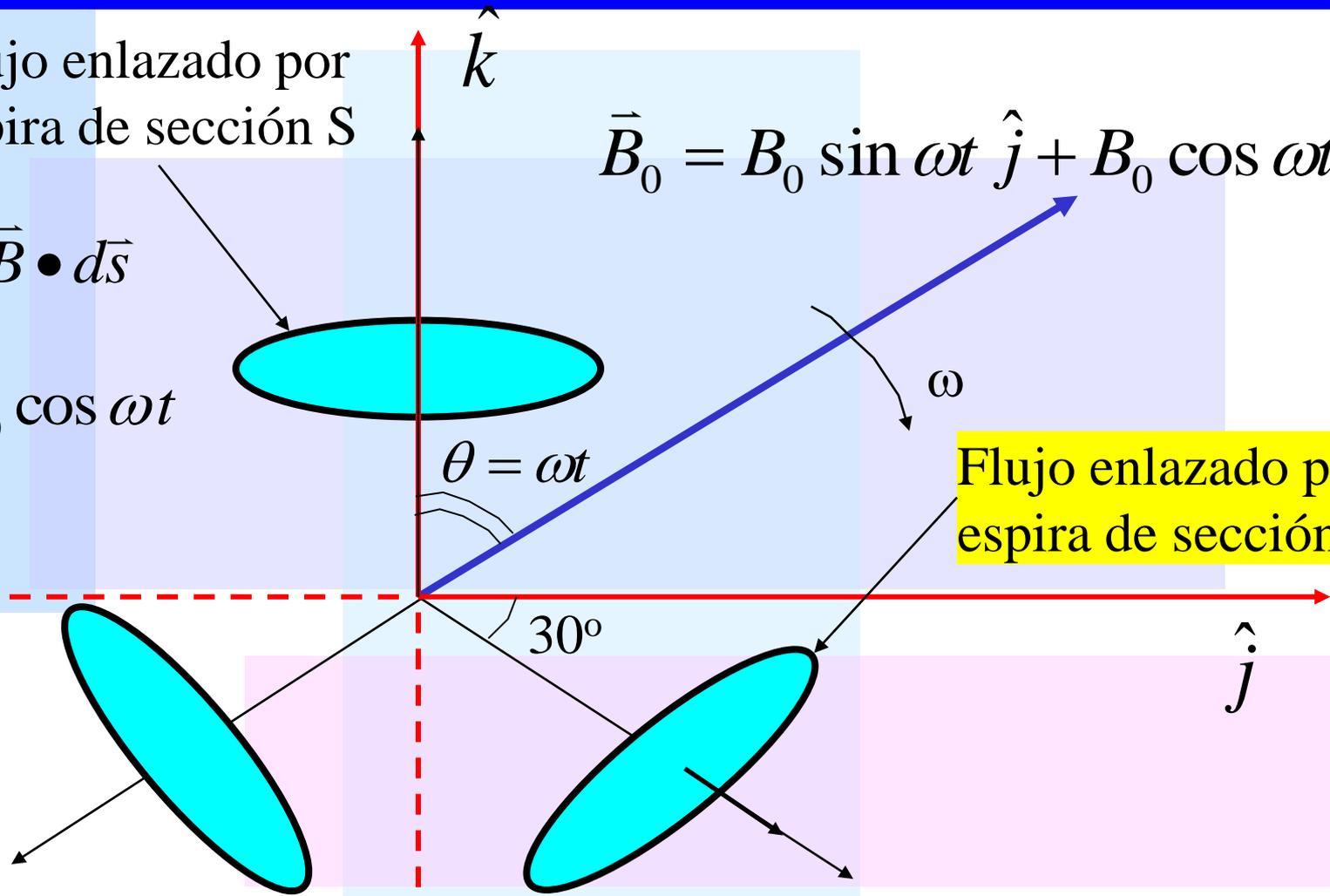
Flujo enlazado por  
espira de sección S

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$\Phi_a = SB_0 \cos \omega t$$

$$\vec{B}_0 = B_0 \sin \omega t \hat{j} + B_0 \cos \omega t \hat{k}$$

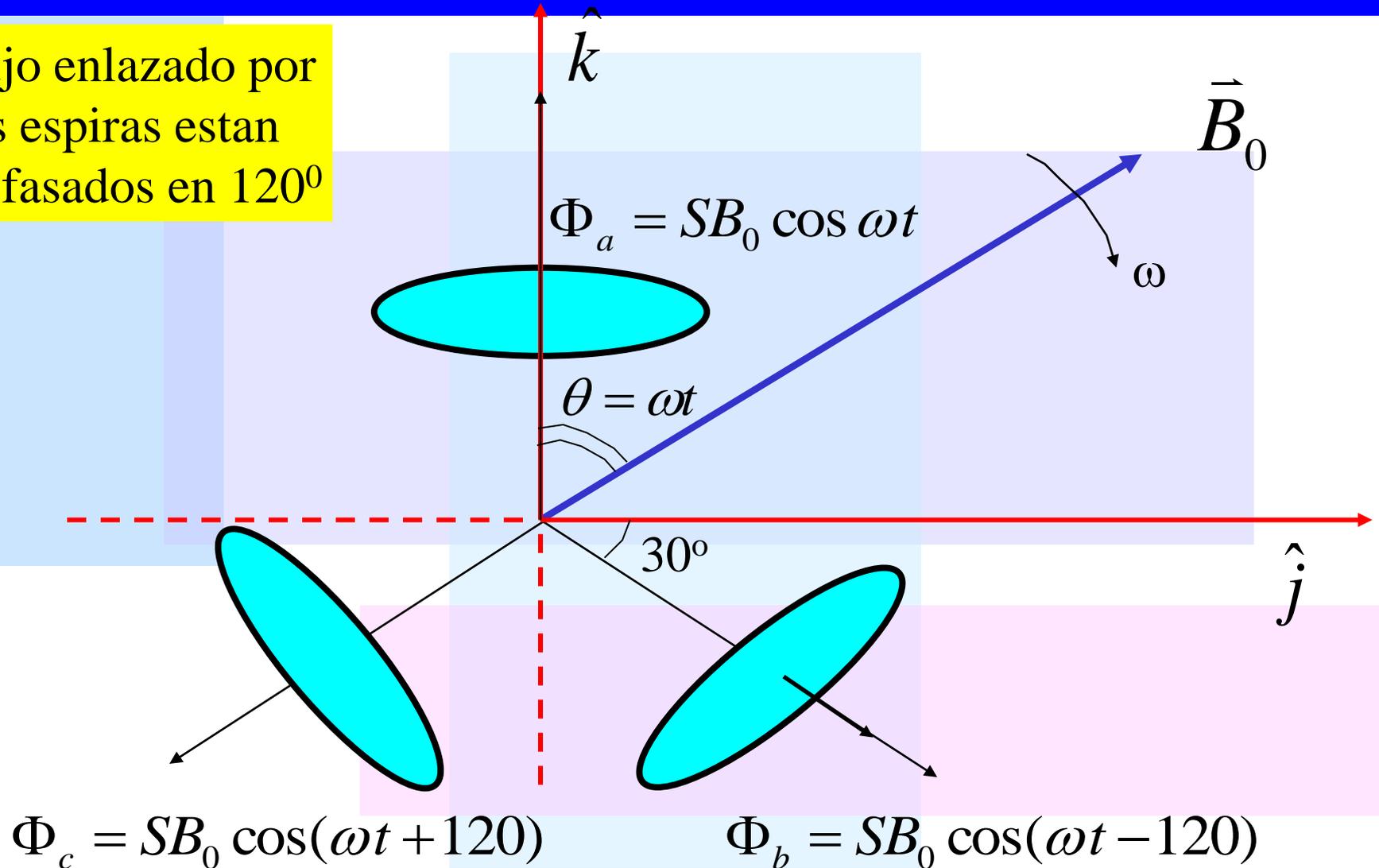
Flujo enlazado por  
espira de sección S

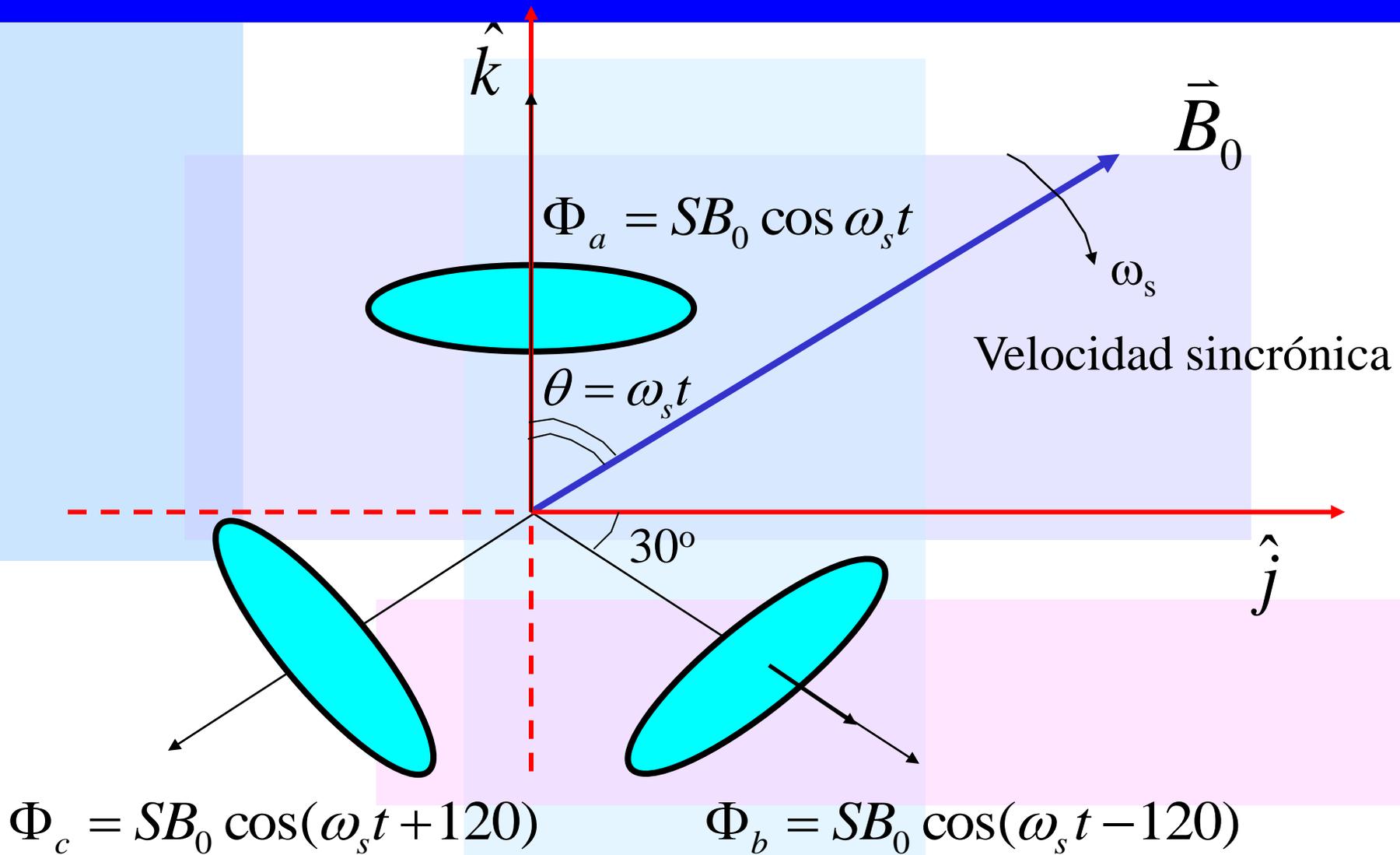


$$\Phi_b = SB_0 \cos(\omega t - 120)$$



Flujo enlazado por tres espiras estan desfasados en  $120^\circ$

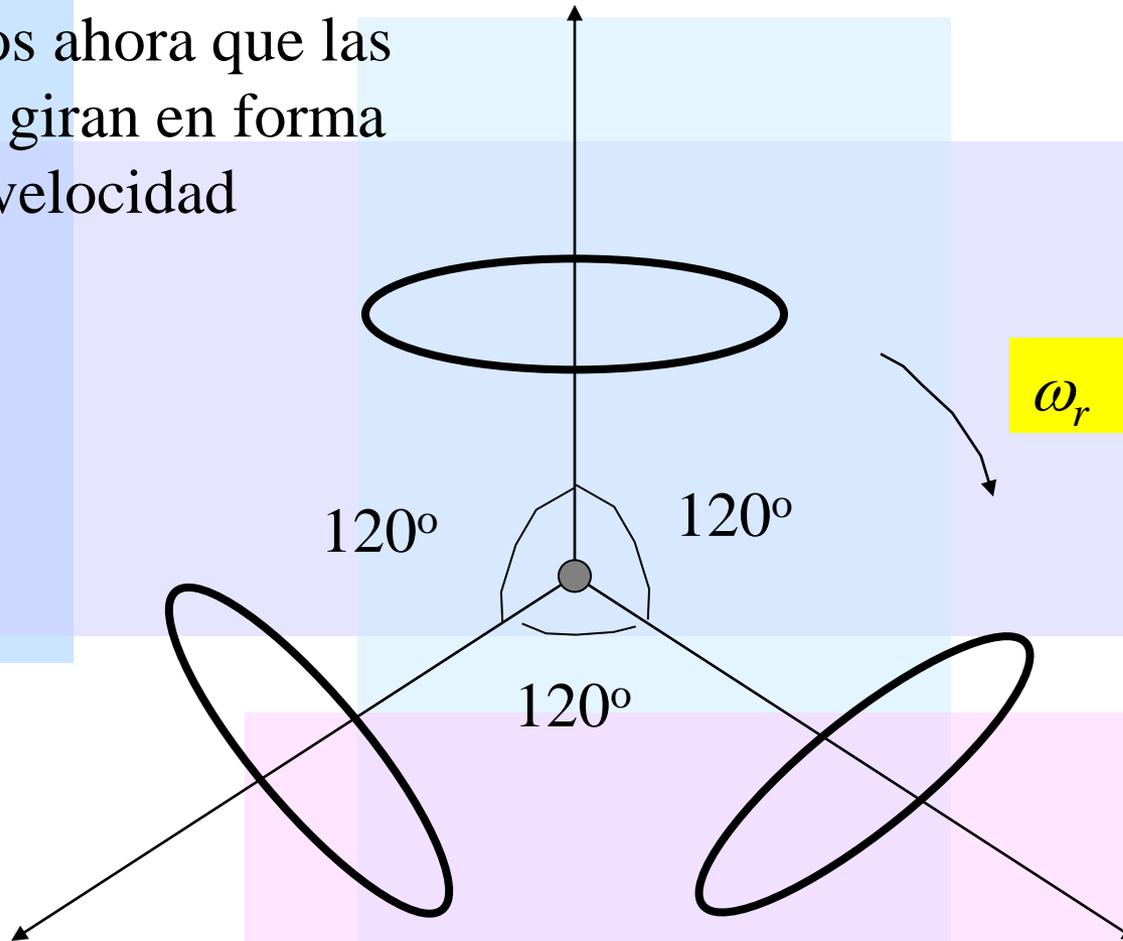






# Principios de la Máquina de Inducción

Supongamos ahora que las tres espiras giran en forma solidaria a velocidad angular  $\omega_r$





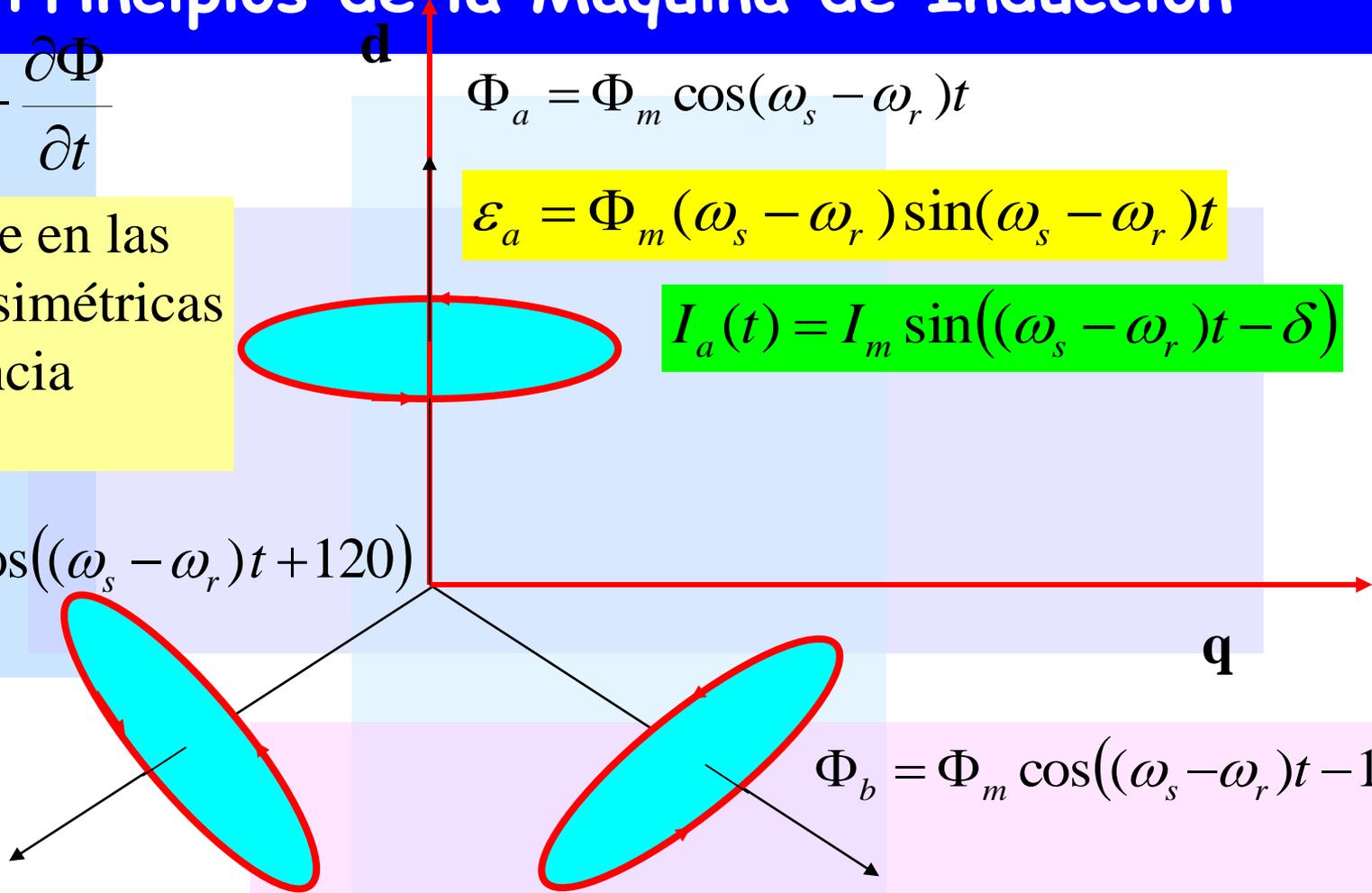
# Principios de la Máquina de Inducción

$$\varepsilon = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Las corriente en las espiras son simétricas y de frecuencia

$$\omega = \omega_s - \omega_r$$

$$\Phi_c = SB_0 \cos((\omega_s - \omega_r)t + 120)$$



$$\Phi_a = \Phi_m \cos((\omega_s - \omega_r)t)$$

$$\varepsilon_a = \Phi_m (\omega_s - \omega_r) \sin((\omega_s - \omega_r)t)$$

$$I_a(t) = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - \delta)$$

$$\Phi_b = \Phi_m \cos((\omega_s - \omega_r)t - 120)$$

$$\varepsilon_c = \Phi_m (\omega_s - \omega_r) \sin((\omega_s - \omega_r)t + 120)$$

$$\varepsilon_b = \Phi_m (\omega_s - \omega_r) \sin((\omega_s - \omega_r)t - 120)$$

$$I_c = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t + 120 - \delta)$$

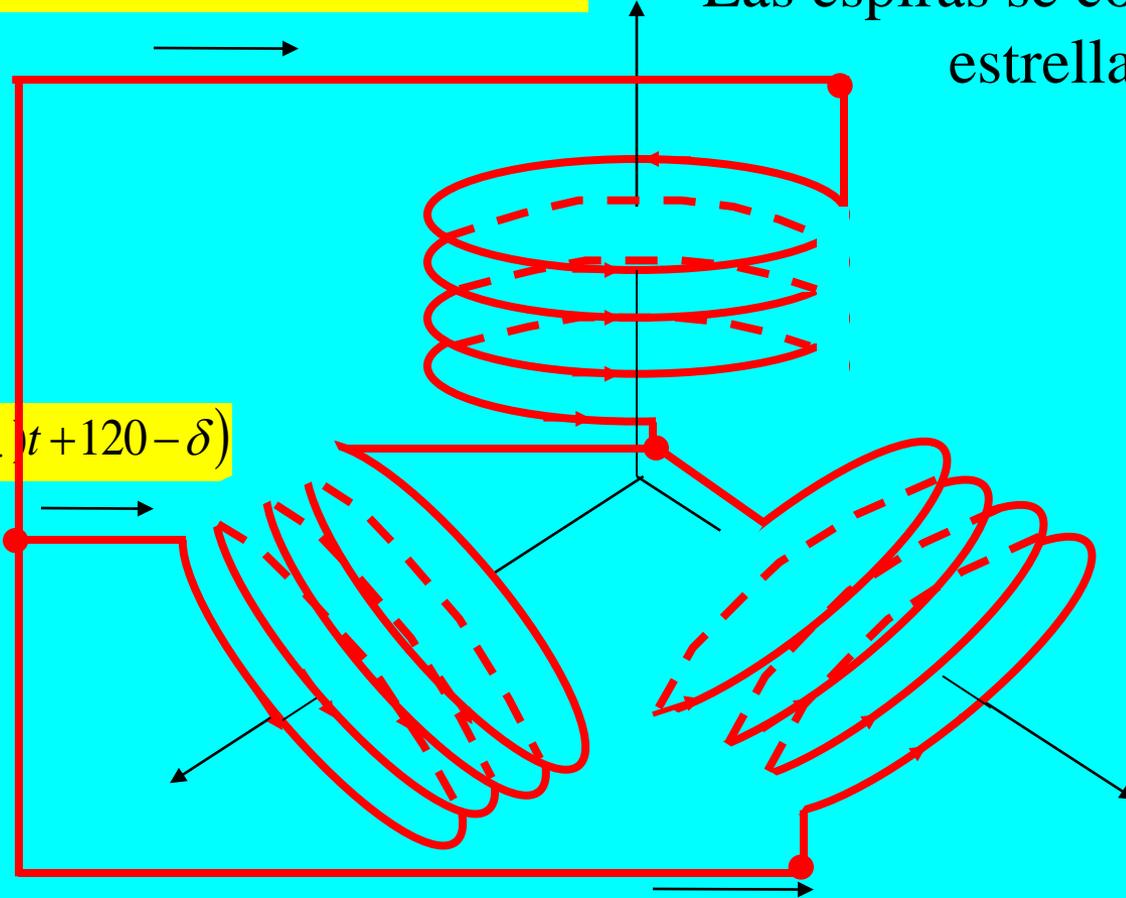
$$I_b = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - 120 - \delta)$$



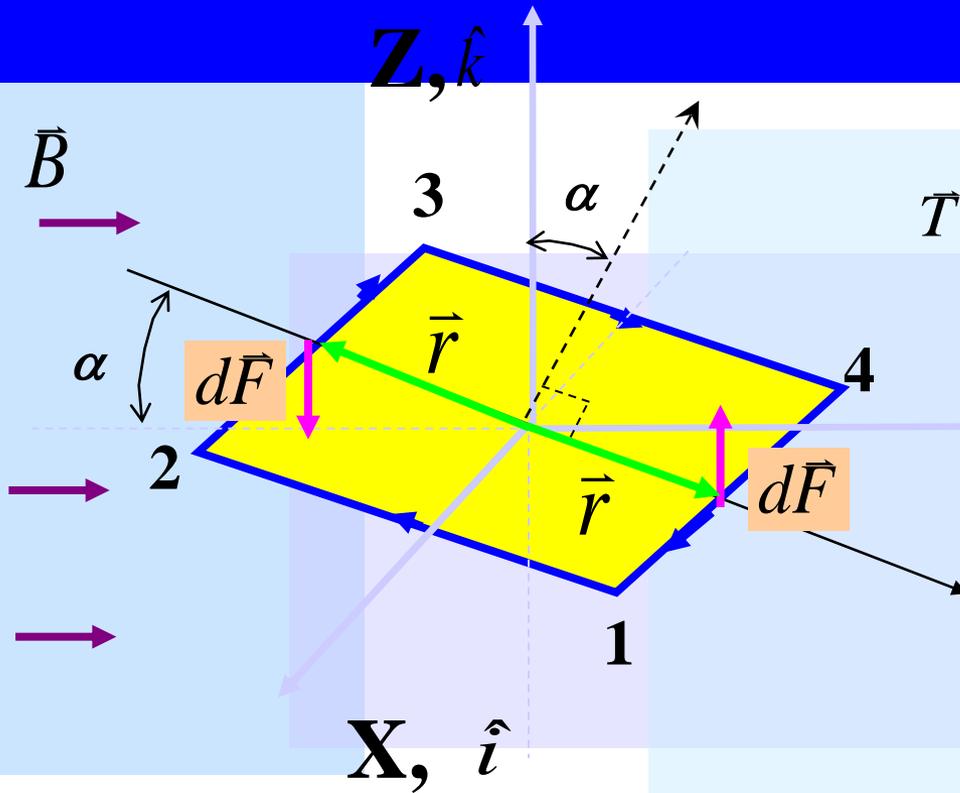
$$I_a(t) = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - \delta)$$

Las espiras se conectan en  
estrella

$$I_c = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t + 120 - \delta)$$



$$I_b = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - 120 - \delta)$$



$$\vec{T} = I \int_2^3 \vec{r} \times d\vec{x} \hat{i} \times \vec{B} + I \int_4^1 \vec{r} \times d\vec{x} \hat{i} \times \vec{B}$$

$$\vec{T} = \frac{Blwl}{2} \cos \alpha \hat{i} + \frac{Blwl}{2} \cos \alpha \hat{i}$$

**Torque neto sobre el circuito**

$$\vec{T} = Blwl \cos \alpha \hat{i}$$

ó  $\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}$

**donde**

$$\vec{m} = A \cdot I \hat{n}$$

**A : área circuito**  
 **$\hat{n}$  : normal**

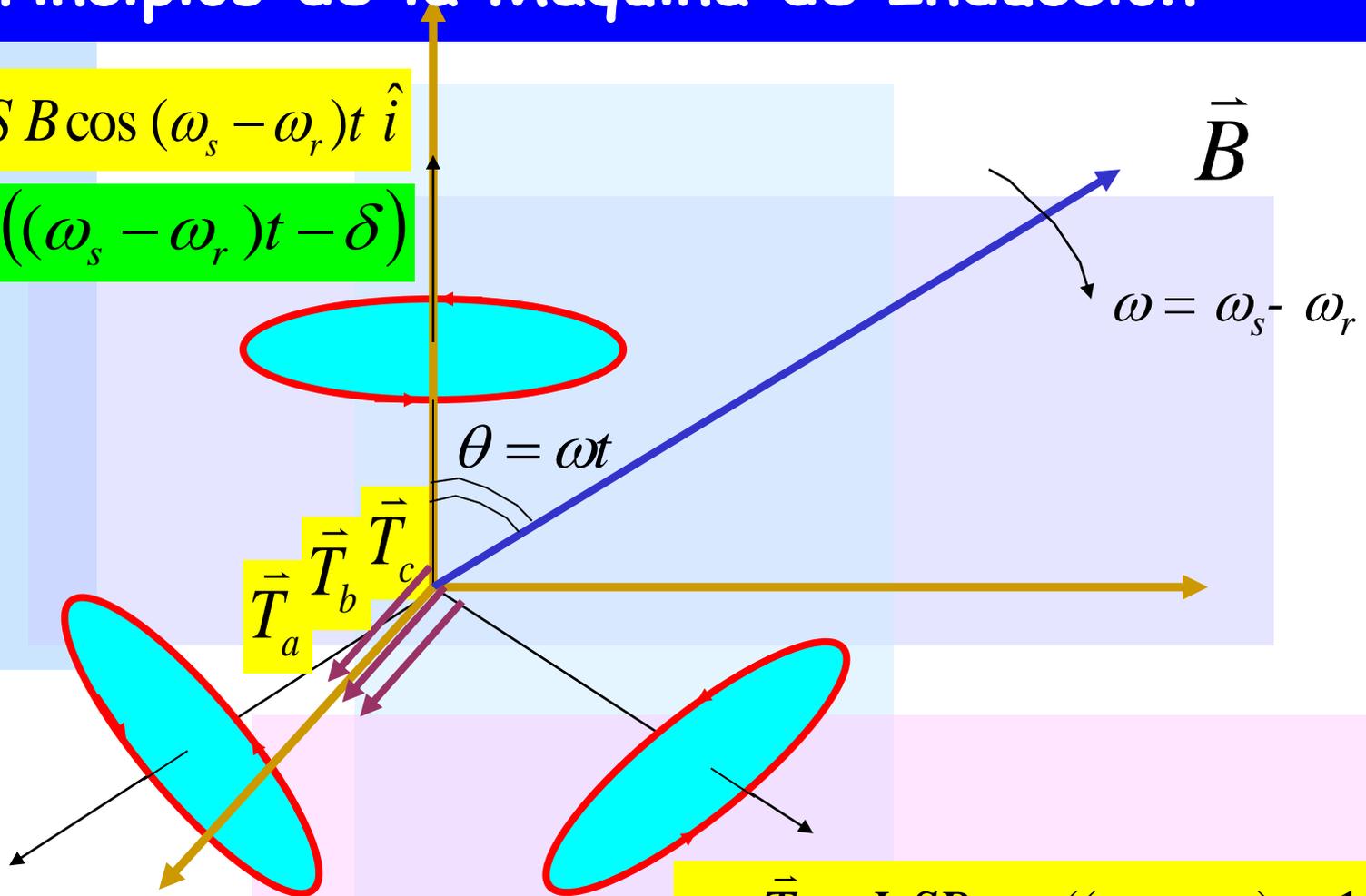
**En nuestro caso  $\alpha = (\omega_s - \omega_r)t$**



# Principios de la Máquina de Inducción

$$\therefore \vec{T}_a = I_a S B \cos(\omega_s - \omega_r)t \hat{i}$$

$$I_a = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - \delta)$$



$$\therefore \vec{T}_c = I_c S B \cos((\omega_s - \omega_r)t + 120) \hat{i}$$

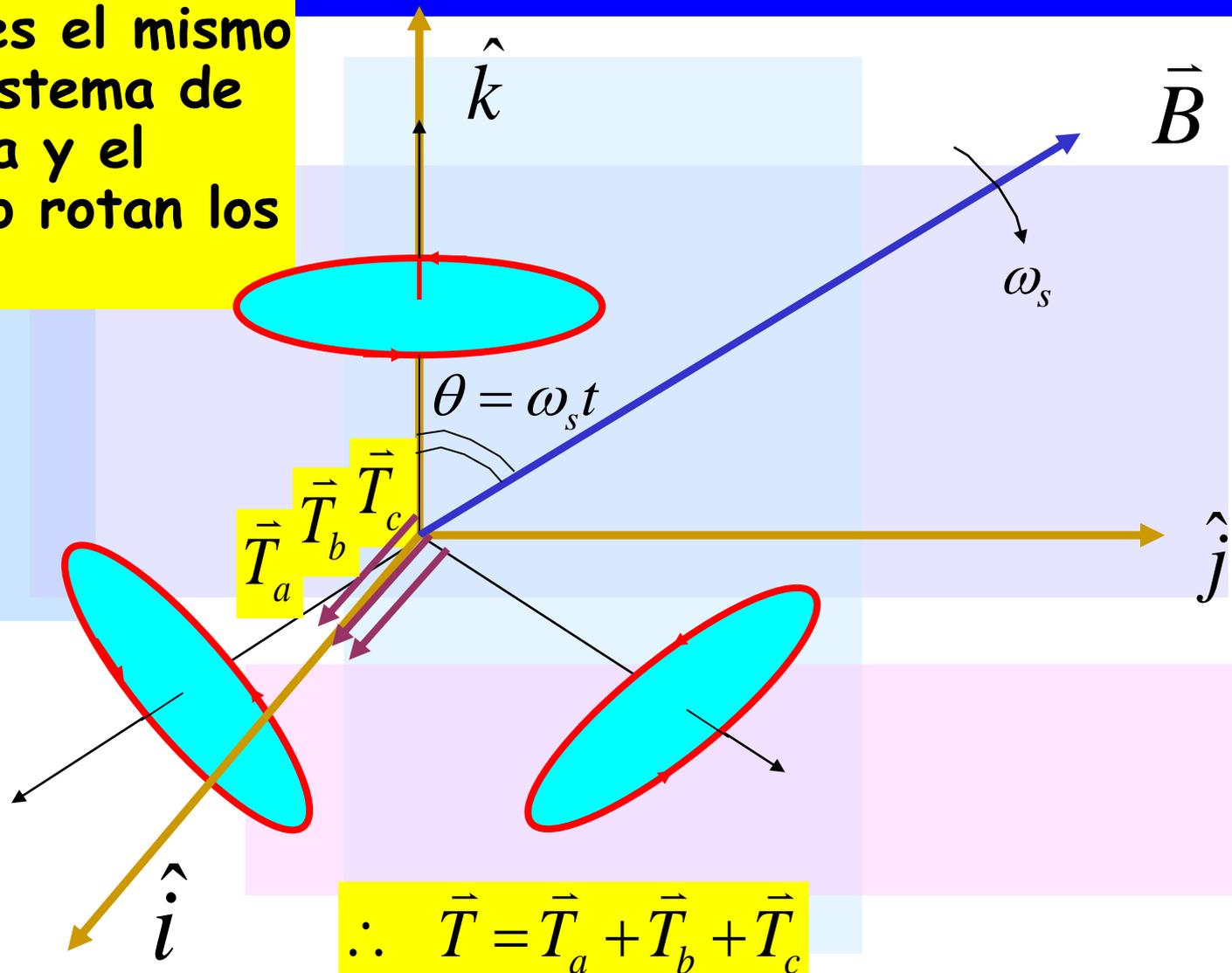
$$I_c = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t + 120 - \delta)$$

$$\therefore \vec{T}_b = I_b S B \cos((\omega_s - \omega_r)t - 120) \hat{i}$$

$$I_b = I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - 120 - \delta)$$



El eje x es el mismo para el sistema de referencia y el móvil (sólo rotan los ejes y-z)



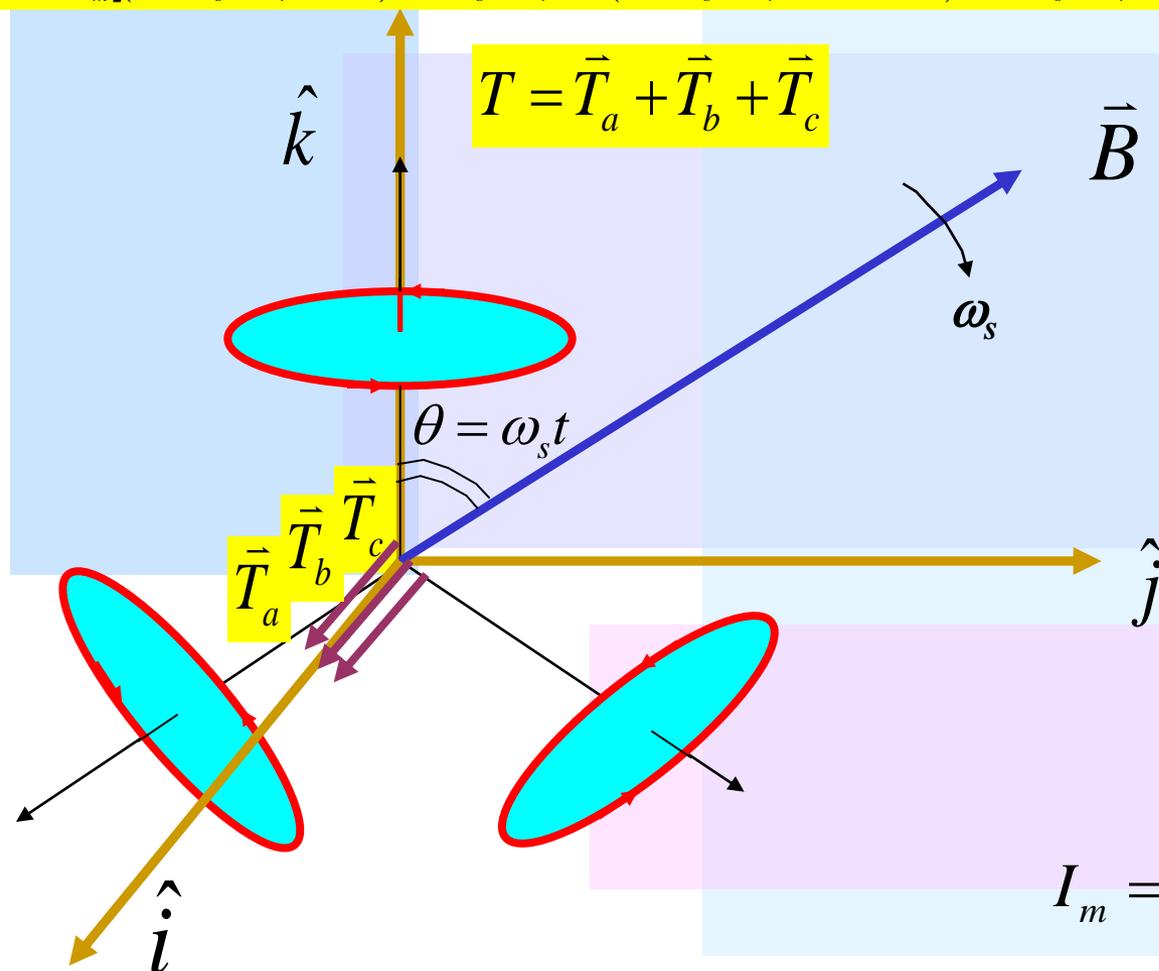
$$\therefore \vec{T} = \vec{T}_a + \vec{T}_b + \vec{T}_c$$



# Principios de la Máquina de Inducción

$$\vec{T} = (I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - \delta))S \cos(\omega_s - \omega_r)t \hat{i} + (I_m \sin((\omega_s - \omega_r)t - 120 - \delta))S \cos((\omega_s - \omega_r)t - 120) \hat{j} + (I_m \sin(\omega_s - \omega_r)t + 120 - \delta))S \cos((\omega_s - \omega_r)t + 120) \hat{k}$$

$$\vec{T} = SI_m [(\sin((\omega_s - \omega_r)t - \delta)) \cos(\omega_s - \omega_r)t + (\sin((\omega_s - \omega_r)t - 120 - \delta)) \cos((\omega_s - \omega_r)t - 120) + (\sin(\omega_s - \omega_r)t + 120 - \delta)) \cos((\omega_s - \omega_r)t + 120)] \hat{i}$$



$$\therefore \vec{T} = \frac{3}{2} BSI_m \sin(\delta) \hat{i}$$

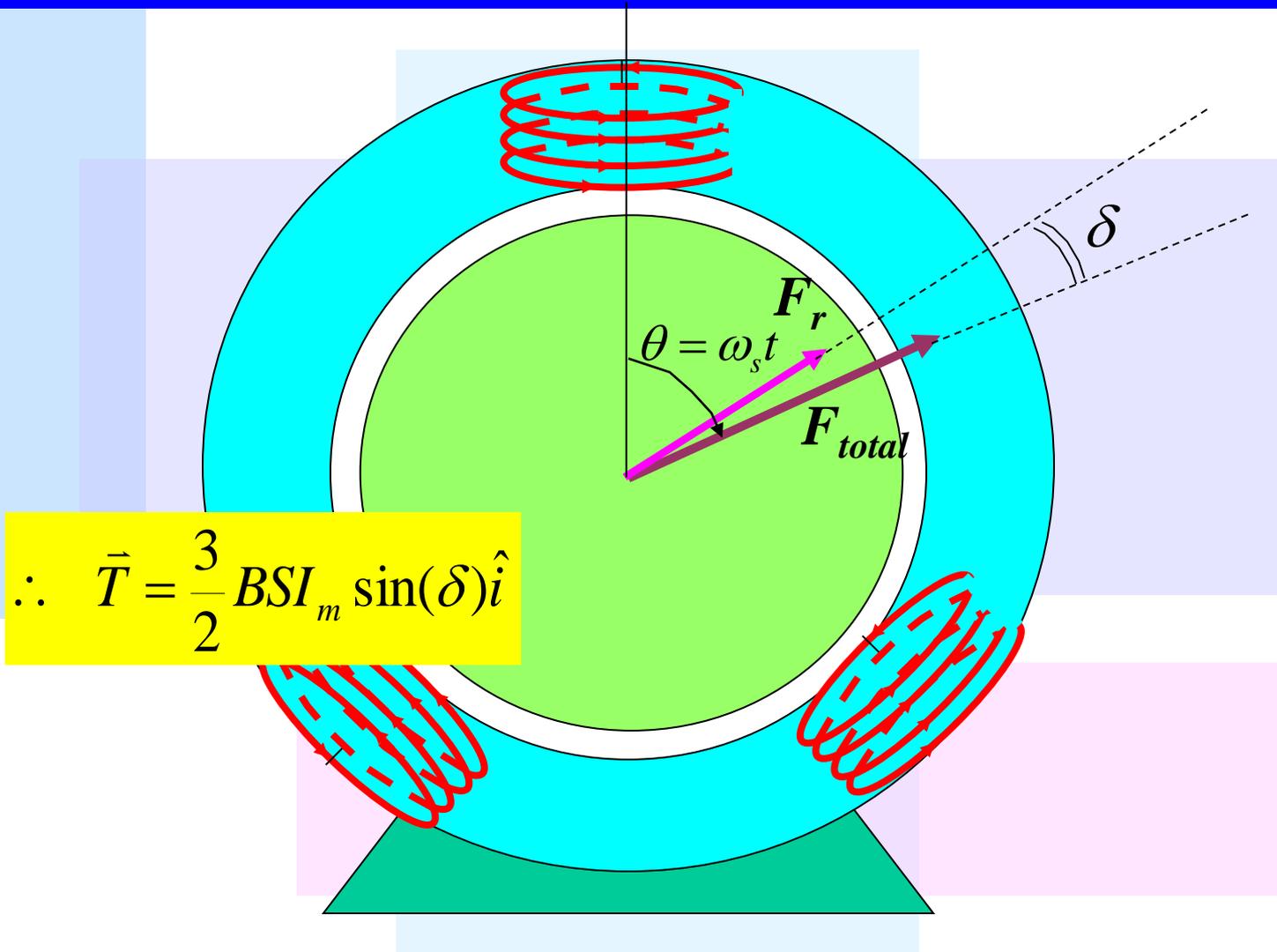
Para  $\omega_s$  y  $\omega_r$  dados el torque en el eje es **CONSTANTE!**

Notar que si  $\omega_s = \omega_r$  el torque es nulo, ya que la corriente es nula

$$I_m = \frac{\Phi m (\omega_s - \omega_r)}{[R^2 + X^2]^{1/2}} = \frac{\Phi m}{\|Z_r\|} (\omega_s - \omega_r)$$

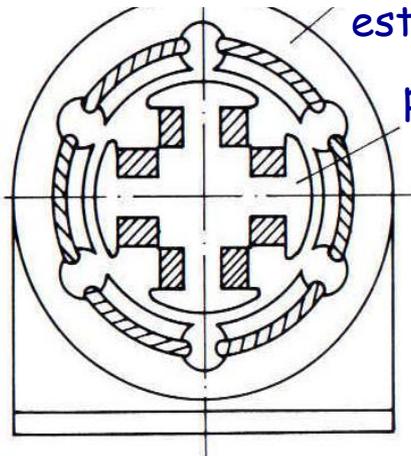
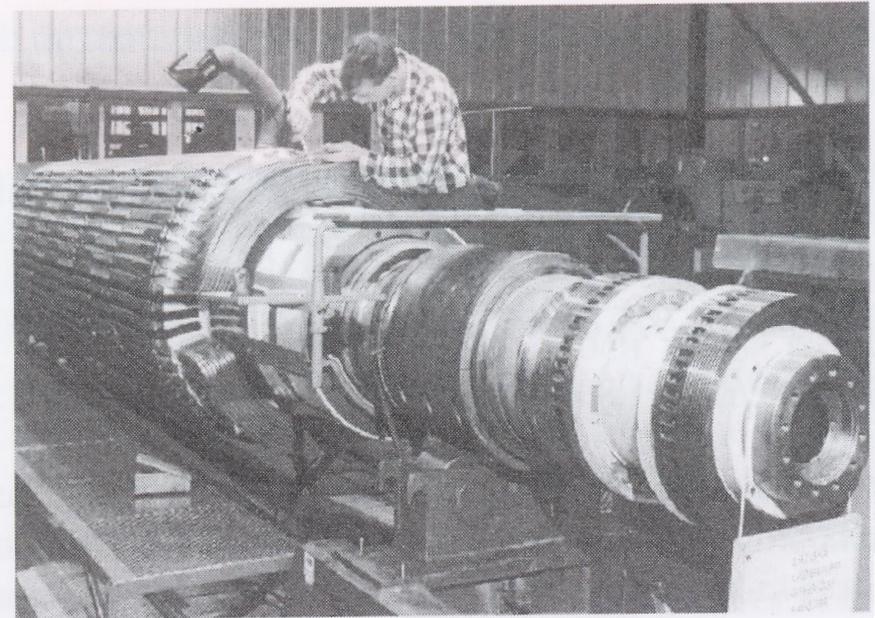
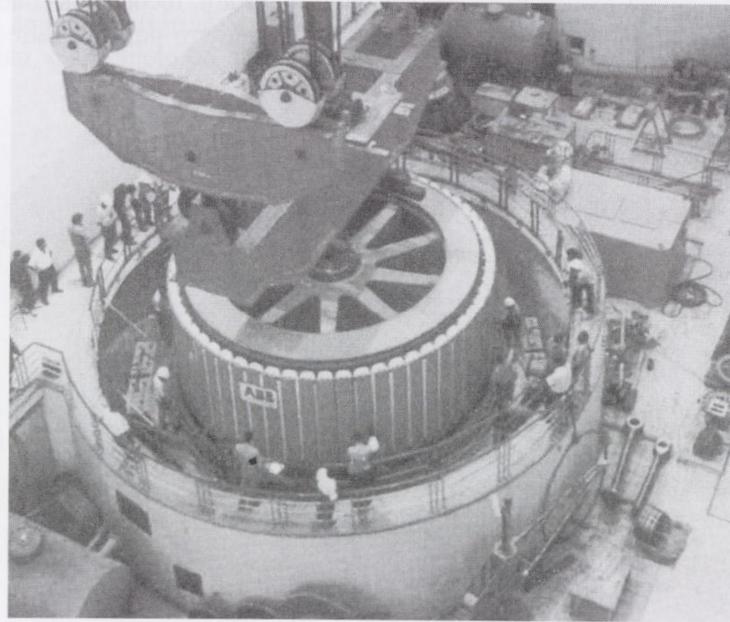


# Principios de la Máquina de Inducción





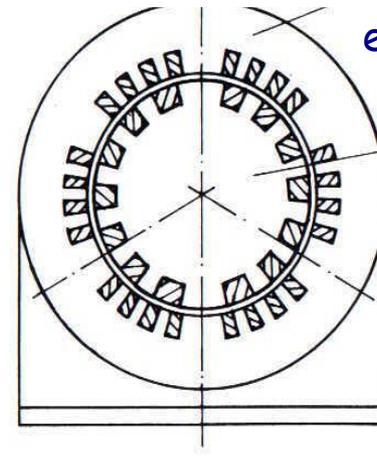
# Generador Sincrónico



estator

polo saliente

**Máquina de  
Polos  
Salientes**



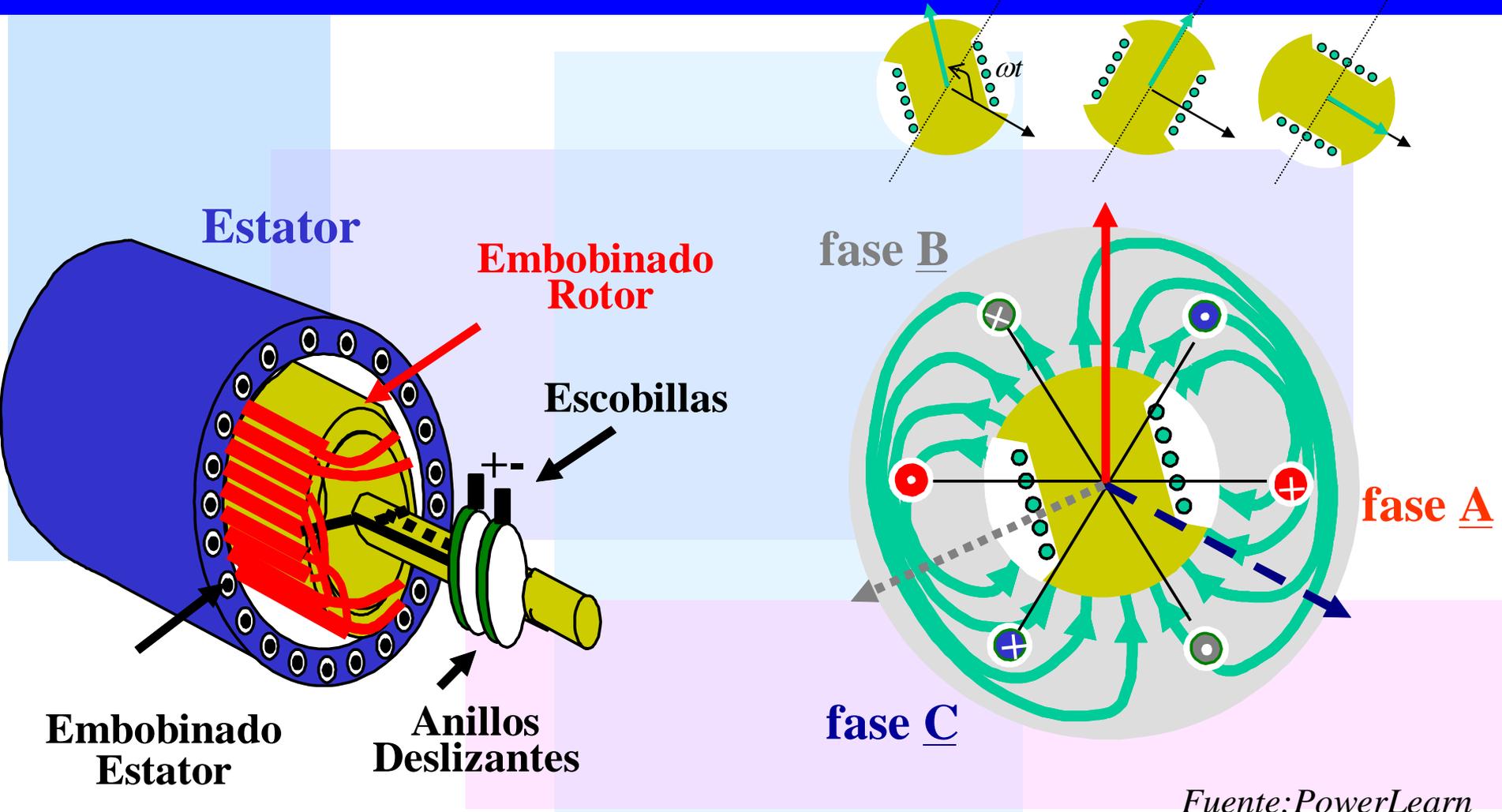
estator

rotor

**Máquina de  
Rotor  
Cilíndrico**



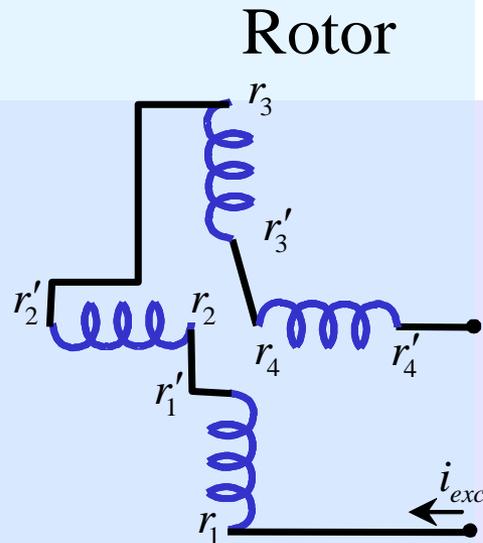
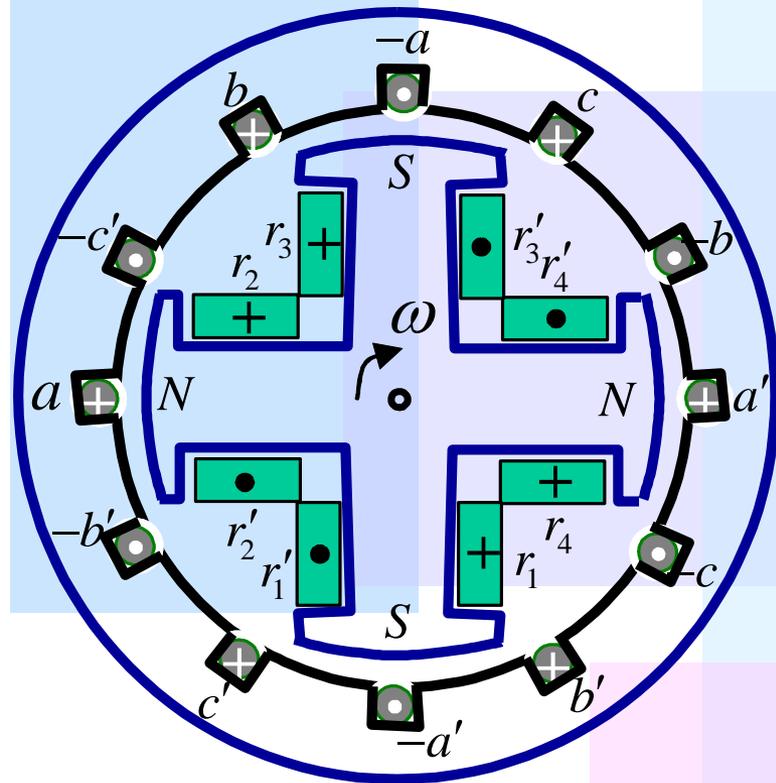
# Generador Síncrono



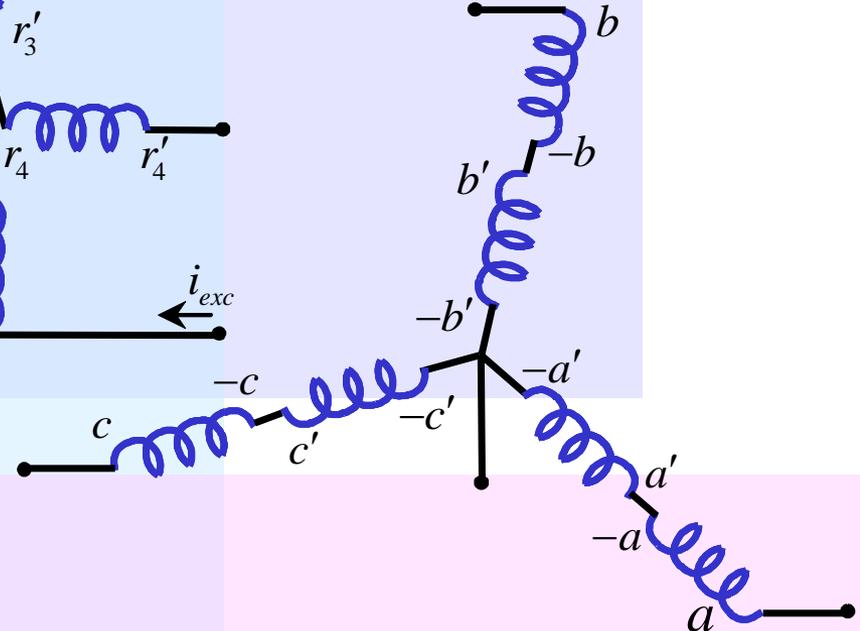
## Aspectos constructivos



# Generador Sincrónico



## Estator



Conexión Serie de Bobinas en  
Máquina de 2 pares de polos



## Generador Síncrono

- Rotor genera un campo rotatorio -> pasa al estator a través del entrehierro o separación de aire.
- Al girar el rotor (campo) con velocidad  $n$  (rpm o rev/min) o velocidad angular  $\omega_m$  --> inducirán tensiones senoidales de frecuencia angular  $\omega$  ( $2\pi f$ ) en conductores de la armadura

$$n = \frac{\omega_m}{2\pi} 60 \quad \text{Caso 1 par de polos} \quad \longrightarrow \quad n = \frac{\omega}{2\pi} 60 = f 60 [\text{rpm}]$$

- Para  $f=50$  Hz --> 3000 (rpm)!!! (máquinas hidráulicas operan en rango 150 a 500 rpm)
- Solución --> incrementar número de pares de polos ( $p$ ) utilizando el hecho de que:

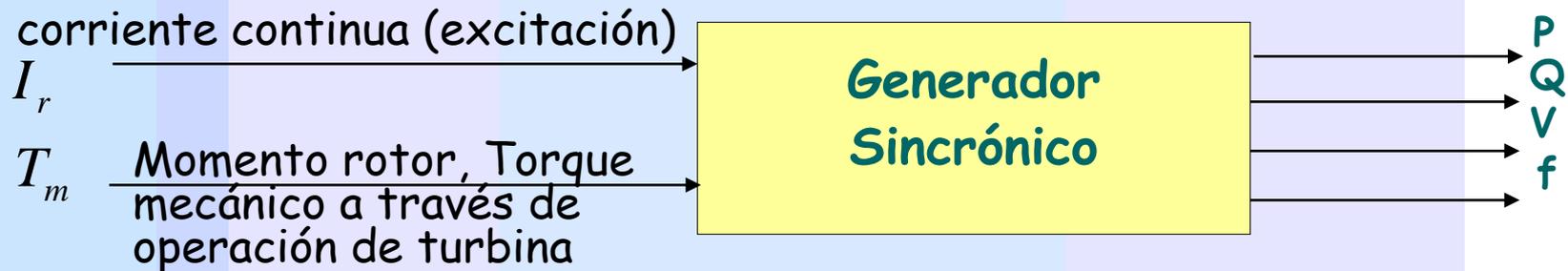
$$\omega = p \omega_m \quad \longrightarrow \quad n = \frac{\omega}{2\pi p} 60 = \frac{f}{p} 60 [\text{rpm}]$$

- Al considerar una carga trifásica conectado al devanado del estator --> circula una corriente de frecuencia  $f$  --> frecuencia de red y velocidad de giro relacionadas en forma fija.



# Generador Sincrónico

## Comportamiento Dinámico del Generador



- Necesidad de simplificaciones para tratar relaciones existentes entre las variables de control y de salida. Dos casos extremos:

- 1.- Generador conectado a barra infinita
- 2.- Generador conectado a impedancia única

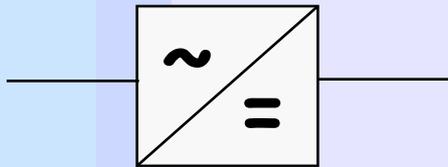


# Tipo de Conversores

## Alterna - Continua

Conversión de Corriente Alterna a Continua

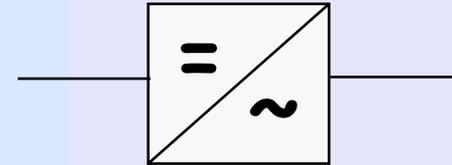
⇒ **Rectificador**



## Continua - Alterna

Conversión de Corriente Continua a Alterna

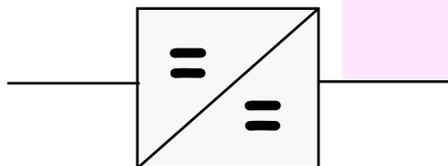
⇒ **Inversor**



## Continua - Continua

Conversión de Corriente con un nivel de tensión y polaridad dados, a otro nivel de tensión y/o polaridad

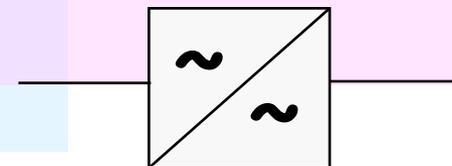
⇒ **Convertidores de CC**



## Alterna - Alterna

Conversión de Corriente Alterna con un nivel de tensión, frecuencia y fase dados, a otro nivel de tensión, frecuencia y/o fase.

⇒ **Cicloconvertidores**





Conexión y Sincronización a la Red

Excitatri

de la EP

Sistema de Control para los Convertidores de Conexión a la red de Suministro del Sistema de Trenes

Conexión a la Red Trenes

Sistemas de Suministro Ininterrumpido

Reactividad Sistema de Generación Eólica

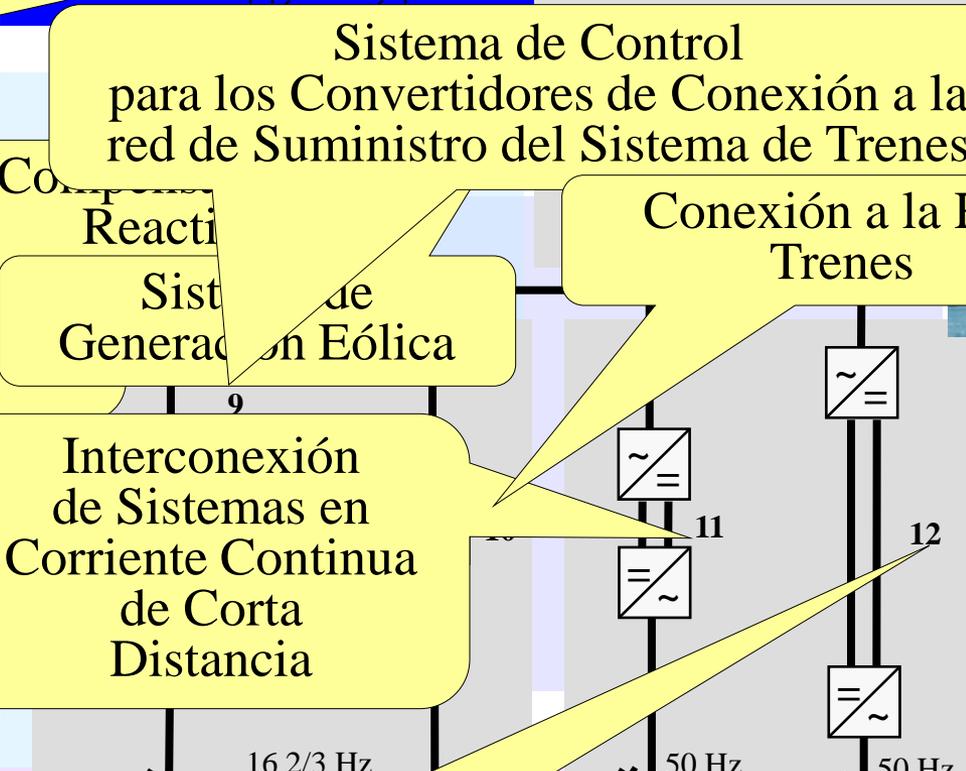
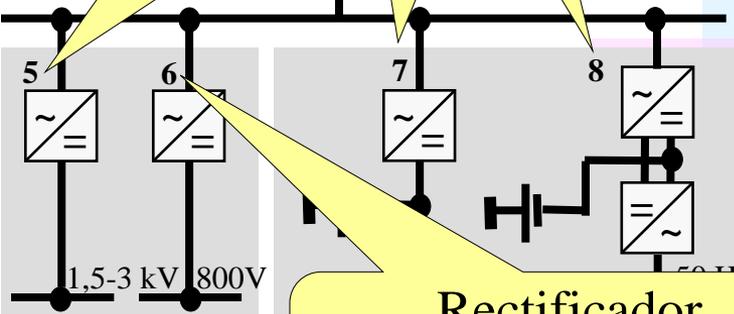
Sistema de Inyección en Base a Baterías

Interconexión de Sistemas en Corriente Continua de Corta Distancia

para Tracción de Trenes

Interconexión de Sistemas en Corriente Continua de Larga Distancia

Rectificador para Tracción de Trenes de Ciudad





# Conversión de Energía a través de la EP

Entradas:  
 $V_e, I_e, f_e$

Convertidor de potencia  
en base a interruptores  
de EP

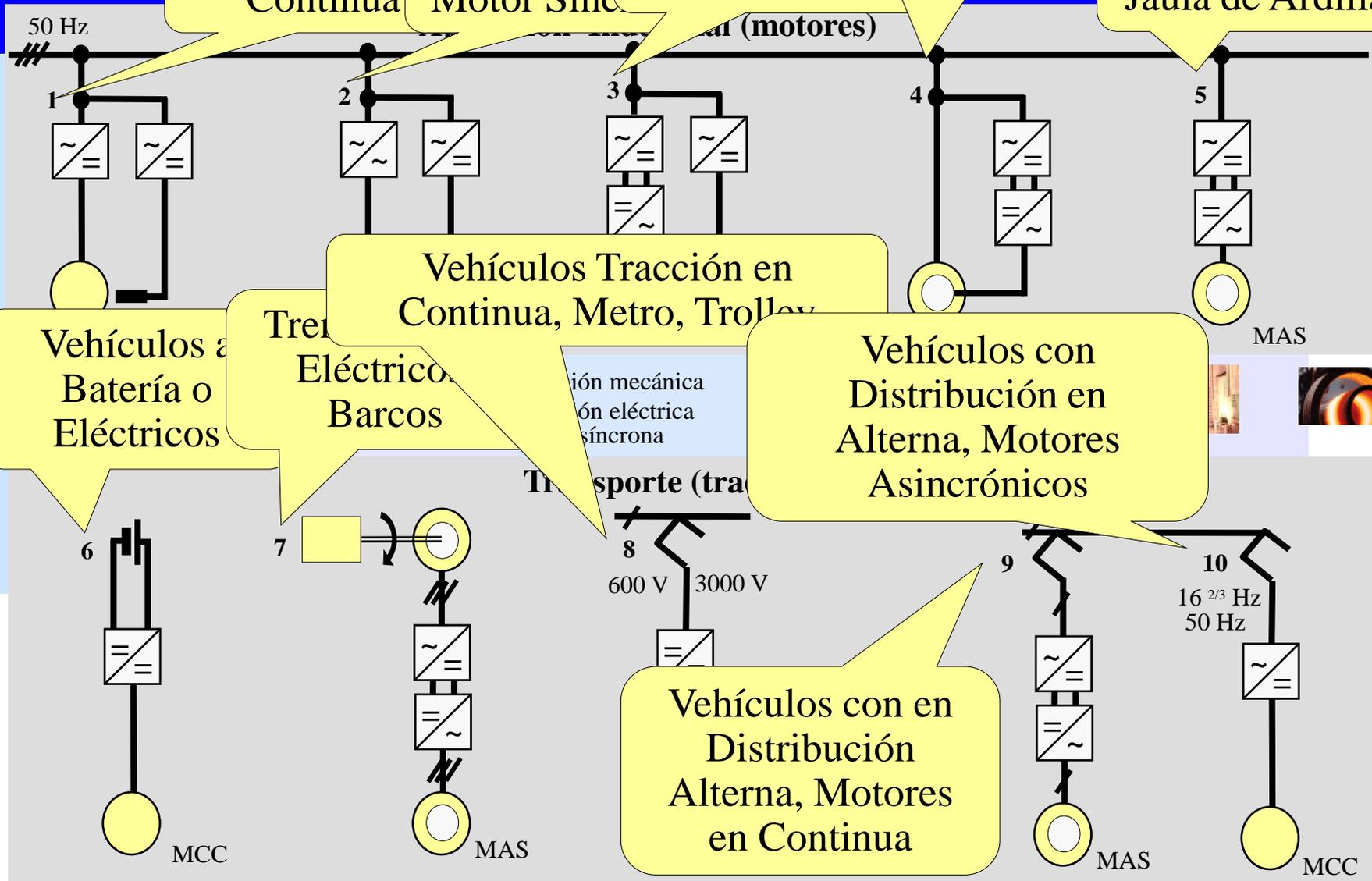
Salidas:  
 $V_s, I_s, f_s$

Los convertidores pueden unidireccionales o bidireccionales en cuanto al flujo de potencia

CONTROL

Se mantiene constante el voltaje en un condensador o corriente en una inductancia

Controla la salida a través del disparo de los interruptores.  
Interesa que la velocidad de conmutación sea alta para obtener armónicas de alta frecuencia que sean fáciles de filtrar.



Tracción en Continua  
 Rectificación Motor Síncrono  
 Inversor Motor Síncrono  
 Motor asincrónico  
 Inversor Motor Jaula de Ardilla

Vehículos a Batería o Eléctricos

Tren Eléctrico, Barcos  
 Vehículos Tracción en Continua, Metro, Trolley

Vehículos con Distribución en Alterna, Motores Asincrónicos

Vehículos con en Distribución Alterna, Motores en Continua

Tracción mecánica  
 Tracción eléctrica síncrona

Transporte (tra)

MAS



MCC

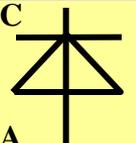
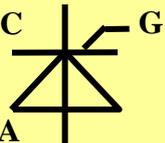
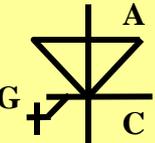
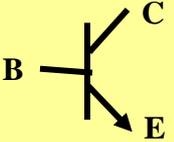
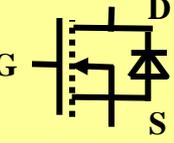
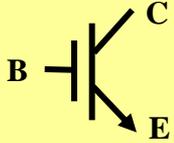
MAS

MAS

MCC



# Datos Característicos de Semiconductores de Potencia

Símbolo	Límites de Operación	Caída de Voltaje	Costo Adquisición	Controlabilidad
 <b>Diodo</b>	50V/100A (Schottky) 30kV/0,5A o 500V/10kA (Si.)	0,3 V (Schottky) 2V (Si.)	Bajo	-----
 <b>SCR</b> Tiristor	$U_{AC}=8000V$ $I_A=6000A$	2 .. 3 V	Medio	Ángulo de Encendido
 <b>GTO</b> Gate Turn Off Thyristor	$U_{AC}=6000V$ $I_A=6000A$	3 .. 4 V	Muy Elevado	Ángulo de Encendido y Apagado
 <b>Transistor Bipolar</b>	$U_{CE}=1200V$ $I_C=300A$	1 .. 2 V	Elevado	Ángulo de Encendido y Apagado
 <b>MOSFET</b> Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	$U_{DS}=1000V,$ $I_D=15A /$ $U_{DS}=50V,$ $I_D=250A$	$< 1 .. 10 V$ (~1% de $U_{DS,max}$ )	Bajo	Ángulo de Encendido y Apagado
 <b>IGBT</b> Insulated Gate Bipolar Transistor	$U_{CE}=3000V$ $I_C=3000A$	2 .. 4 V	Medio	Ángulo de Encendido y Apagado