



Máquinas eléctricas de corriente alterna

Capítulo 1

Aspectos Generales de las Máquinas Eléctricas Rotativas



David Santos Martín



CAPÍTULO 1 Aspectos generales



Universidad
Carlos III de Madrid

1.1.- Introducción

1.2.- Componentes básicos

1.3.- Fundamentos magnéticos



1.1 Introducción

- 1.1.1.- Formas constructivas
- 1.1.2.- Grados de protección
- 1.1.3.- Clases de aislamiento
- 1.1.4.- Clases de servicio
- 1.1.5.- Placa de características



Parámetros para clasificar las formas constructivas según norma CEI- Code I

1- Forma de fijación de la máquina:

mediante patas a una base con railes o directamente a la máquina mediante una brida.

2- Existencia de cojinetes y tapas laterales y su disposición

3- Existencia de un segundo eje libre (además del primer eje)

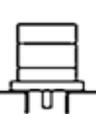
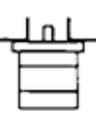
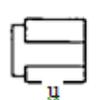
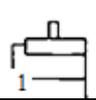
La **designación** de las distintas alternativas es:

IM (international mounting) + **B** (eje horizontal) o **V** (eje vertical) + **nº nº**

Los dos dígitos **nº nº** definen la existencia o no de patas/bridas, tipo de extremo de eje...



Formas constructivas Según norma CEI- Code I

Símbolo	Esquema	Cojinetes	Carcasa	Eje	Generalidades
83		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre	Montada sobre subestructura
B35		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre	Brida del lado de la carga. Montada sobre subestructura con fijación suplementaria por la brida
B5		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre	Brida del lado de la carga. Fijada por la brida
B6		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre	Igual que B3, pero con tapas giradas 90°. Montada en pared, patas a la izquierda
V1		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre, para abajo	Brida del lado de la carga. Fijada por la brida abajo
V3		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre, para arriba	Brida del lado de la carga. Fijada por la Mida arriba
V36		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para arriba	Brida del lado de la carga. Montada sobre pared o subestructura con fijación suplementaria por la brida
V5		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para sobre abajo	Igual que B3. Montada pared o subestructura
V6		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para arriba	Igual que B3. Montada sobre pared o subestructura

Función de la envolvente de la máquina eléctrica



La envolvente sirve para:

- Fijar y sustentar las chapas magnéticas del estator
- Transmite al suelo, el par de reacción que se ejerce sobre la máquina.
- Evacua el calor producido por las pérdidas.
- Sustenta los cojines, *encoders*, etc..
- Protege los elementos internos de polvo, humedad, etc.



CAPÍTULO 1 Introducción

1.1.2 Grados de protección de las máquinas eléctricas



Índice de protección: **IP XY**

Primera cifra significativa	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido.	Ninguna protección especial.
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm.	Una gran superficie del cuerpo humano (por ejemplo, la mano), pero ninguna protección contra una penetración deliberada. Cuerpos sólidos de más de 50 mm de diámetro.
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm.	Los dedos u objetos análogos que no excedan de 80 mm de longitud. Cuerpos sólidos de más de 12 mm de diámetro.
3	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 2.5 mm.	Herramientas, alambres, etc., de diámetro o de espesor superiores a 2.5 mm. Cuerpos sólidos de más de 25 mm de diámetro.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1.0 mm.	Alambres o bandas de espesor superior a 1.0 mm, Cuerpos sólidos; de más de 1.0 mm de diámetro.
5	Protegido contra el polvo.	No se impide del todo la penetración de polvo, pero éste no puede penetrar en cantidad suficiente como para perjudicar el buen funcionamiento del material.
6	Totalmente protegido contra el polvo.	No hay penetración de polvo.

Segunda cifra significativa	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido.	Ninguna protección especial.
1	Protegido contra la caídas	Las gotas de agua <i>que caen verticalmente</i> no deben producir efectos perjudiciales.
2	Protegido contra las caídas de agua con una inclinación	1.a caída vertical de gotas de agua no debe producir efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinada hasta 15° de su posición normal.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia,	El agua que caiga en forma de lluvia en una dirección que tenga respecto de la vertical un ángulo inferior o igual a 60° no debe producir efectos perjudiciales.
4	Protegido contra las proyecciones de agua.	El agua proyectada sobre la envolvente desde cualquier dirección no debe producir efectos perjudiciales.
5	Protegido contra los chorros	E/ agua lantada sobre la envolvente por una boquilla desde cualquier dirección no debe prodwir efssitos perjudiciales.
6	Protegido contra los embates	Con mar gruesa o mediante dual»s potentes el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidad perjudicial.
7	Protegido contra los efectos de la inmersión,	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida en agua. con una presión y un tiempo detenninado.
8	Protegido contra la inmersión prolongada,	El material es adecuado para la inmersión prolongada en agua en las condicione, especificadas por el fabricante.

X: 1ª cifra caracteriza la protección de personas y la penetración de cuerpos sólidos

Y: 2ª cifra caracteriza la protección contra la penetración de agua



Función del aislamiento

La función principal del aislamiento:

- Separar partes a distinto potencial (conductores, chapas, carcasa ..)
- La calidad del aislamiento determina la fiabilidad del servicio, ya que es el elemento más sensible, especialmente a elevadas temperaturas
- Las normas UNE 21-305 y CEI-85 especifican la clasificación térmica de los aislantes

Ley de vida útil
(ley de Montsinger):

$$t_{util} = C \cdot e^{-\alpha t}$$



t_{util} : vida esperada en años

C : Constante dependiente del material

$e^{-\alpha t}$: Constante dependiente de la clase térmica del material

t : Temperatura del aislante en °C

Por cada 10 °C de elevación de la temperatura la vida se acorta en un factor de 2 ($\alpha \approx 0.07-0.09$)



CAPÍTULO 1 Introducción

1.1.3 Clases de aislamiento de las máquinas eléctricas



Clasificación térmica de los materiales

Denominación Clase	Temp. máx.	Tipos de materiales
Y	90°	Materiales fibrosos a base de celulosa o seda, no impregnados en líquidos aislantes (11).
A	105°	Materiales fibrosos a base de celulosa o seda, impregnados con líquidos aislantes o materiales semejantes (*).
	120°	Fibras orgánicas sintéticas).
B	130°	Materiales a base de poliéster y poliamidas aglutinadas con materiales orgánicos o impregnados en éstos.
F	155	Materiales a base de fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliésteres o epóxidos.
H	180°	Materiales a base de mica, asbestos o fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica, =midas (NOMEXR)(n).
200	200°	Mica, vidrio, cerámica, etc.
220	220P	Mica, vidrio, cerámica, etc., poliimidas (KAPTONn)(").
250	250°	Mica, vidrio, cerámica, etc., rxdiiimidas (KAPTONx)(").

*: en desuso **: marcas registradas

Por cada 10 °C de elevación de la temperatura la vida se acorta en un factor de 2 ($\alpha \approx 0.07-0.09$)



Clases de servicio normalizadas

La norma UNE-20-113 (CEI-34-1) define una serie de servicios normalizados con un factor de marcha asociado (t_r : tpo en carga/ tpo de trabajo)

Clase	Denominación	Observaciones
S1	Servicio continuo.	Funcionamiento a plena carga hasta alcanzar la temperatura de equilibrio.
S2	Servicio de corta duración.	Potencia constante durante un tiempo determinado. No se alcanza la temperatura final.
S3	Servicio intermitente periódico	Funcionamiento cíclico a potencia constante alternando tiempos de funcionamiento y de parada.
S4	Servicio intermitente periódico con arranques.	Lo mismo que S3 pero con influencia apreciable del arranque en el calentamiento.
S5	Servicio intermitente periódico con arranque y frenado,	Lo mismo que S4 pero con influencia apreciable del frenado en el calentamiento.
S6	Servicio continuo periódico.	Funcionamiento cíclico a potencia constante alternando tiempos de funcionamiento en carga y en vacío.
S7	Servicio continuo periódico con arranque.	Lo mismo que S6 pero con influencia apreciable del arranque en el calentamiento.
S8	Servicio continuo periódico con arranque y frenado,	Lo mismo que S7 pero con influencia apreciable del frenado en el calentamiento.



CAPÍTULO 1 Introducción

1.1.5 Placa de características de las máquinas eléctricas



Placa de características de un motor trifásico de c.a.

Clase de servicio si no es de tipo continuo S1

Diagrama de conexión (si hay más de 3 puntos)

Sentido de giro si sólo pueden girar en uno (flecha)

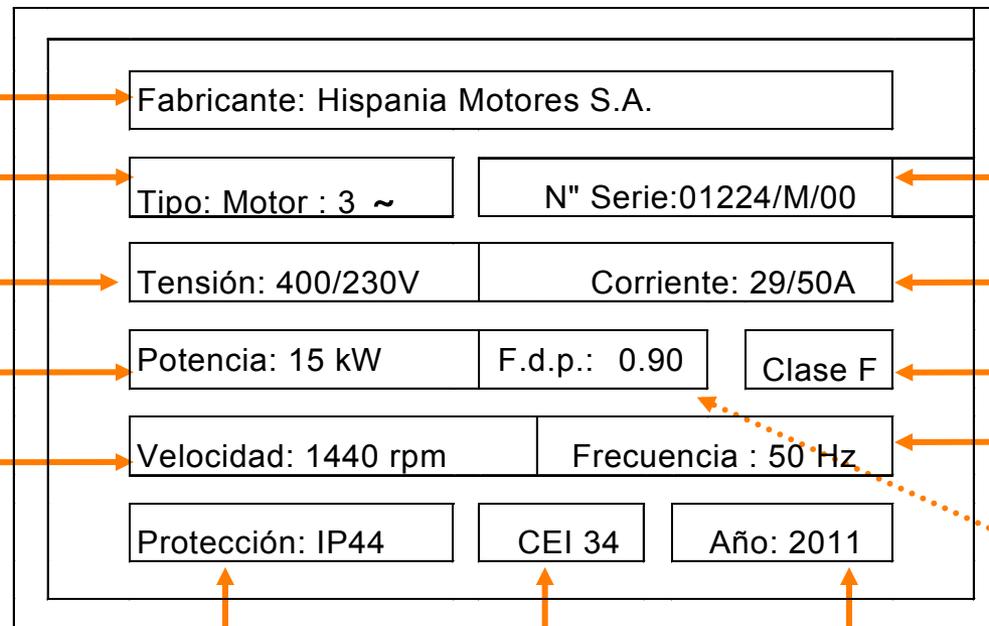
Nombre o marca del constructor

Nº de fases (c.a.)

Tensiones asignadas Y/D

Potencia asignada

Velocidad asignada



Número de serie o marca

Corrientes asignadas Y/D

Clasificación térmica

Frecuencias asignadas

fdp asignado

Grado de protección

Norma aplicable a las características

Año de fabricación

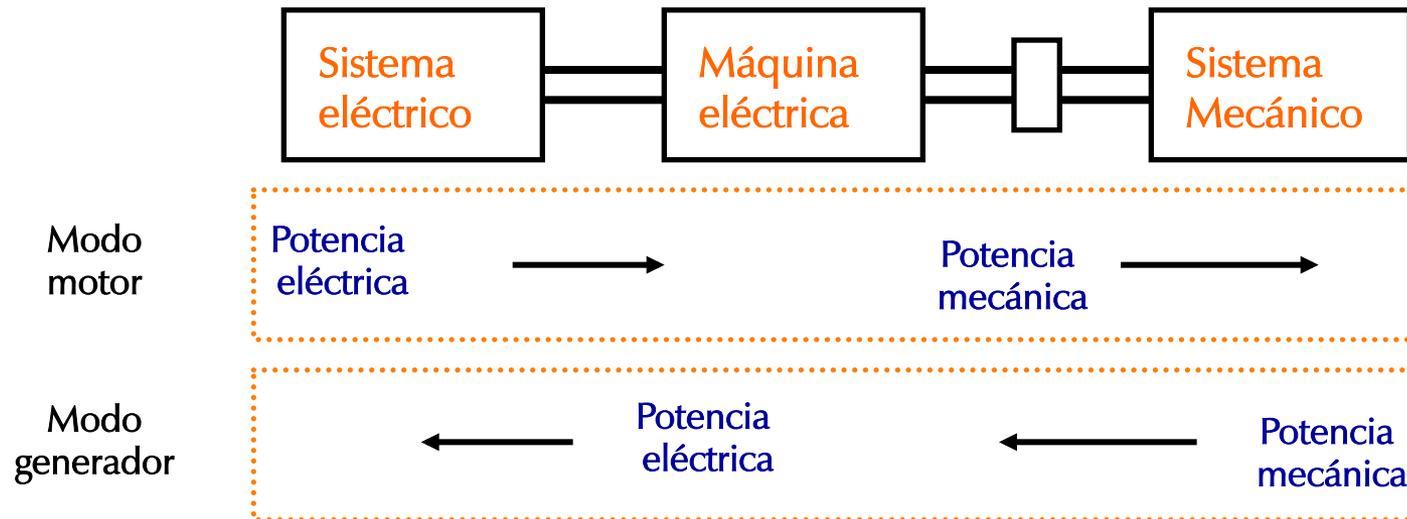


1.2 Componentes básicos



1.2 Componentes básicos

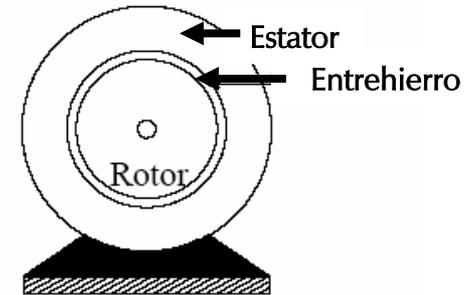
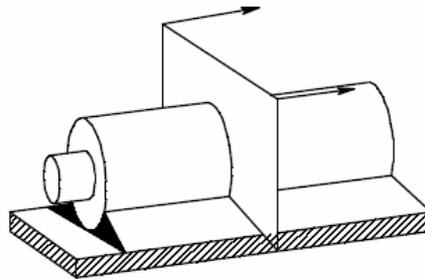
Conjunto máquina y accionamiento



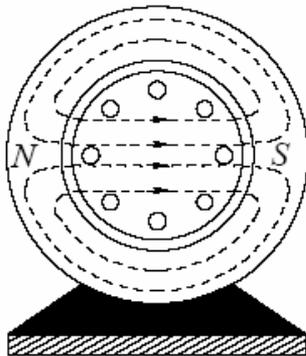


1.2 Componentes básicos

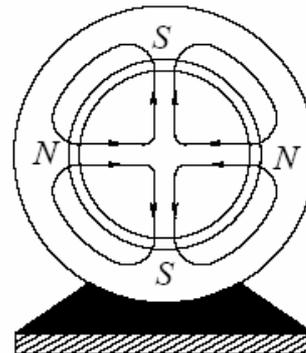
Estructura básica



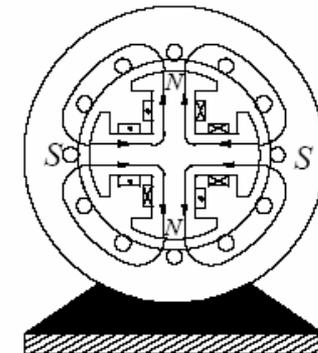
Estructura multipolar



2 polos



4 polos



4 polos salientes



1.3 Fundamentos magnéticos



1.3 Fundamentos Magnéticos

Conceptos básicos

Concepto de campo



Maxwell y Faraday

Ley de Amper



H: intensidad del campo magnético
F: fuerza magneto motriz
B: densidad de flujo o inducción magnética

Ley de inducción de
Faraday (Lenz)



fem: fuerza electromotriz

Definición de inductancia



Ls: Inductancia de dispersión
Lm: inductancia de magnetización

Teorema de Ferraris



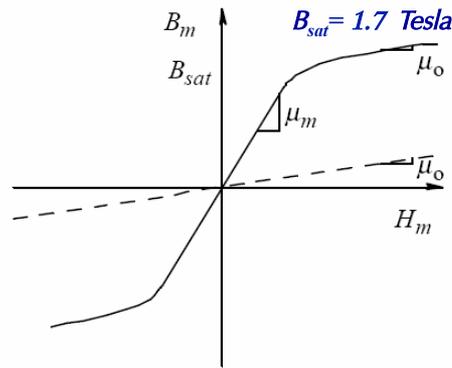
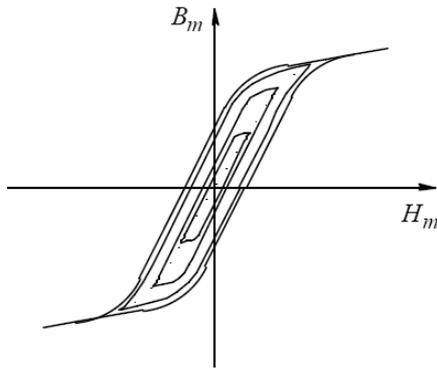
Campo magnético giratorio

<http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm#comienzo>



Densidad de flujo B (Tesla)

Materiales ferromagnéticos



$$B_m = \mu_m H_m = \mu_r \mu_0 H_m$$

Aproximación lineal

En el aire

- $B = \mu_0 H$
- $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ (aire)

En saturación $\mu_m = \mu_0$



1.3 Fundamentos Magnéticos

Flujo (ϕ), enlaces de flujo (λ) y fuerza magnetomotriz (F)

$$\phi_m = B_m \cdot A_m$$

$$\phi_m = \mu_m H_m \cdot A_m = \mu_m N i / l_m \cdot A_m$$

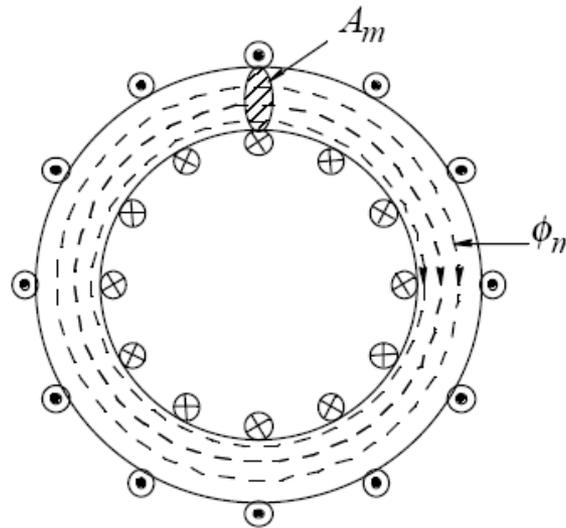
$$\phi_m = F / R_m$$

Flujo magnético (Wb) (ϕ_m)

Reluctancia $R_m = l_m / (\mu_m \cdot A_m)$

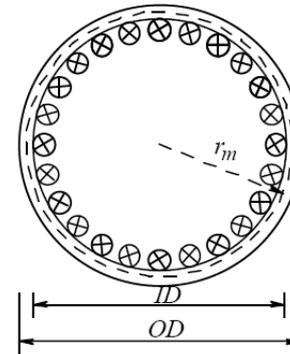
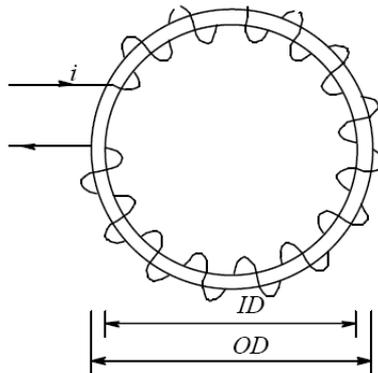
Fuerza magnetomotriz ($F = N \cdot i$)

Enlace de flujo ($\lambda_m = L_m \cdot i$)





Problema 1



1º

Datos
 $N=25$
 $ID=5\text{ cm}$
 $OD=5.5\text{ cm}$
 $i=3\text{ A}$



Calcular
 H_m

2º

Datos
 $\mu_r=2000$



Calcular
 B_m
 ϕ_m



1.3 Fundamentos Magnéticos

Ley de Amper

Ley de Amper



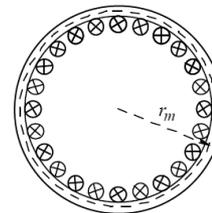
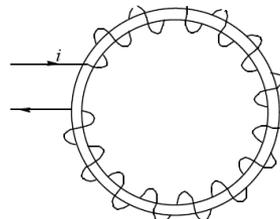
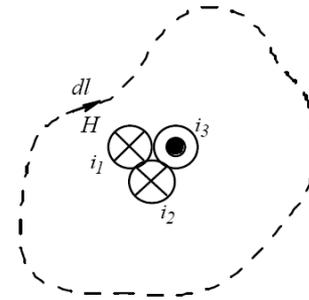
H: intensidad del campo magnético (A-v/m)
 F: fuerza magneto motriz (A-v)
 B: densidad de flujo o inducción magnética (T)

Intensidad de campo magnético



Ley de Amper

$$\int H \cdot d\ell = \sum i = F$$

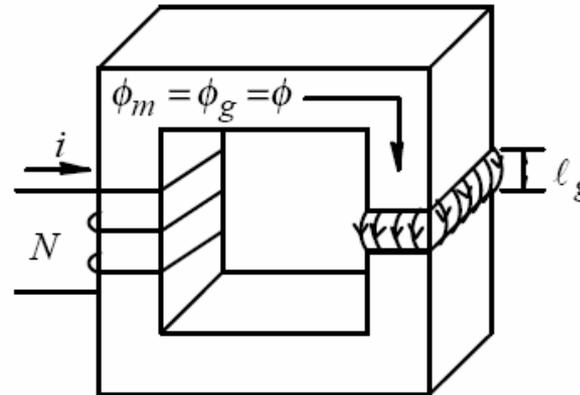


$$l_m = 2\pi r_m$$

$$\int H = Ni / l_m = F$$



Estructura magnética con entrehierro



$$H_m \ell_m + H_g \ell_g = Ni$$

$$B_m = \mu_m H_m, \quad B_g = \mu_o H_g$$

$$\frac{B_m}{\mu_m} \ell_m + \frac{B_g}{\mu_o} \ell_g = Ni$$

$$\phi = A_m B_m = A_g B_g$$

$$B_m = \frac{\phi}{A_m} \quad B_g = \frac{\phi}{A_g}$$

$$\phi_m \left(\underbrace{\frac{\ell_m}{A_m \mu_m}}_{\mathcal{R}_m} + \underbrace{\frac{\ell_g}{A_g \mu_o}}_{\mathcal{R}_g} \right) = Ni$$

$$\phi_m = \frac{F}{\mathcal{R}}$$

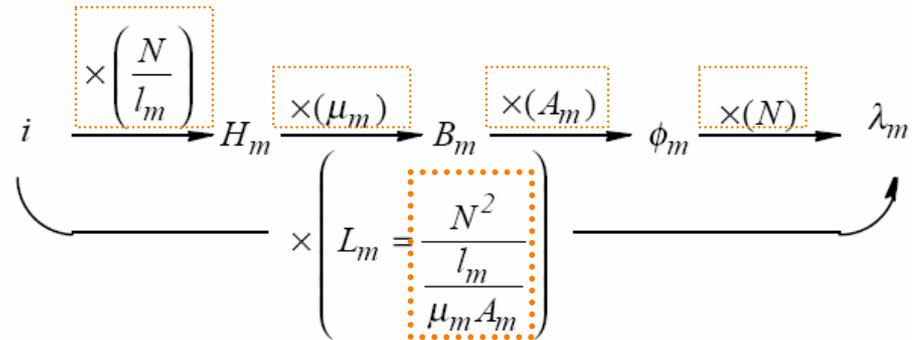
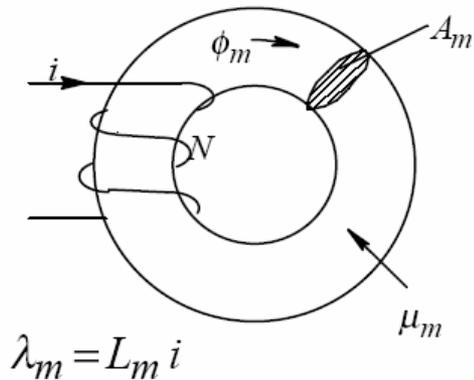
Reluctancia total del circuito (A/Wb)

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_m + \mathcal{R}_g$$



1.3 Fundamentos Magnéticos

Inductancia (L_m)

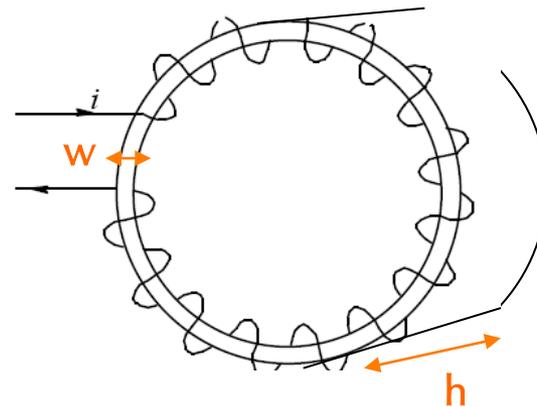


Inductancia (Henrios) $\rightarrow L_m = \frac{\lambda_m}{i} = \left(\frac{N}{l_m} \right) \mu_m A_m N = \frac{N^2}{\left(\frac{l_m}{\mu_m A_m} \right)} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$

En el caso de trabajar en la zona lineal la inductancia sólo depende de parámetros geométricos de la máquina



Problema 1.2 (Toroide rectangular)



Datos

$w = 5 \text{ mm}$
 $h = 15 \text{ mm}$
 $l_m = 18 \text{ cm}$
 $\mu_r = 2000$
 $N = 100 \text{ vueltas}$



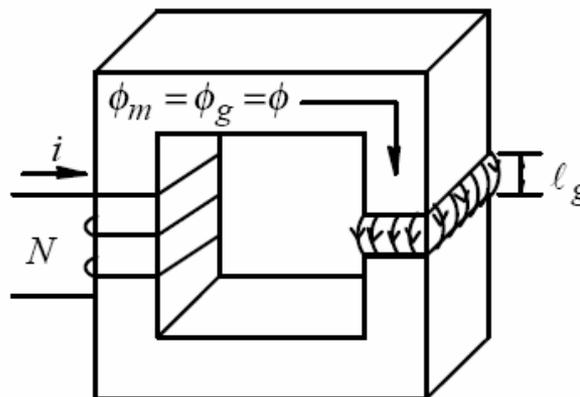
Calcular

L_m



1.3 Fundamentos Magnéticos

Problema 1.3 (Energía almacenada)



Datos

$A_m = 20 \text{ cm}^2$
 $l_m = 40 \text{ cm}$
 $l_g = 2 \text{ mm}$
 $\mu_r = 4500$
 $N = 75 \text{ vueltas}$
 $i = 30 \text{ A}$

Calcular

R_m y R_g
 B_g

1º

Calcular

B_g
Ignorando R_m

2º

Calcular

(energía almacenada)
 W_g y W_m
Compararlas

3º

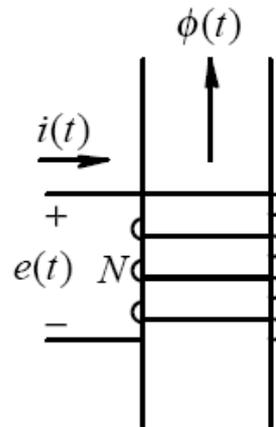


1.3 Fundamentos Magnéticos

Ley de inducción electromagnética de Faraday (Lenz)

La ley de inducción de Faraday (1831) dice que el valor absoluto de la tensión inducida en un circuito (fem: fuerza electromotriz) es proporcional a la rapidez de variación del flujo magnético abarcado, y que su sentido es tal que tiende a establecer una corriente que se oponga a la variación de flujo que la produce (Ley de Lenz).

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$



La variación de flujo puede deberse a:

1. variación temporal del campo magnético
2. variación en la posición relativa de la espira respecto del campo
3. Combinación simultánea

Ley de Lenz (signo de la tensión):
Cuando el flujo y la corriente son coherentes, la tensión tiene el terminal positivo en la entrada de la corriente.

Esta ley se aplica cuando las variables magnéticas son variables en el tiempo (no con corriente continua)



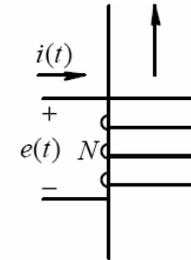
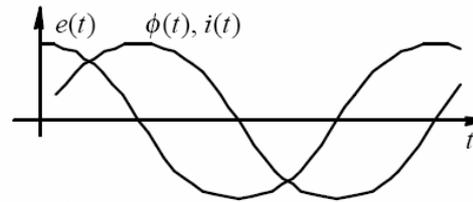
1.3 Fundamentos Magnéticos

Ley de inducción electromagnética de Faraday (Lenz)

Tensión inducida ante régimen permanente senoidal

$$\phi(t) = \hat{\phi} \sin \omega t$$

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} = N \hat{\phi} \omega \cos \omega t$$



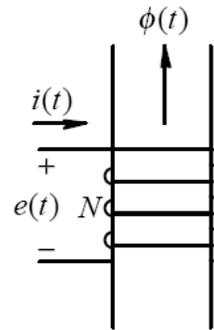
$$\left. \begin{aligned} L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \\ \rightarrow \left. \begin{aligned} i(t) &= \frac{N}{L} \phi(t) \\ e(t) &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \rightarrow e(t) = L \frac{di(t)}{dt} \end{aligned} \right.$$

Esta ley se aplica cuando las variables magnéticas son variables en el tiempo (no con corriente continua)



1.3 Fundamentos Magnéticos

Problema 1.4 (Ley de Faraday)



Datos

$$\begin{aligned}\phi_m &= \phi_m^{\text{pico}} \sin \omega t \\ f &= 50 \text{ Hz} \\ B_m^{\text{pico}} &= 1.5 \text{ T} \\ A_m &= 10 \text{ cm}^2 \\ N &= 300 \text{ vueltas} \\ L &= 50 \text{ mH}\end{aligned}$$

Calcular

- $e(t)$
- Dibujar el flujo y la fem en el tiempo

1º

Calcular

La expresión de $i(t)$

2º



1.3 Fundamentos Magnéticos

Producción del campo magnético

En el entrehierro los campos son radiales
 H_s es positivo saliente del centro y negativo entrante

Usando la ley de Amper $H_s l_g - (-H_s) l_g = N_s i_s$

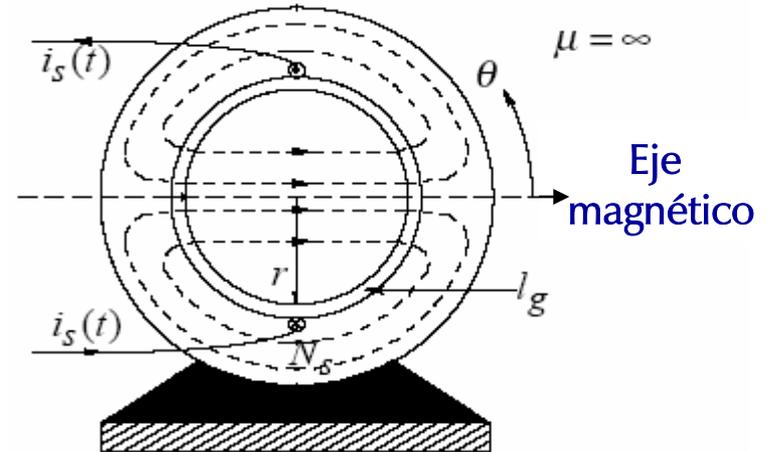
$$H_s = N_s i_s / (2l_g)$$

La fuerza magnetomotriz en el entrehierro

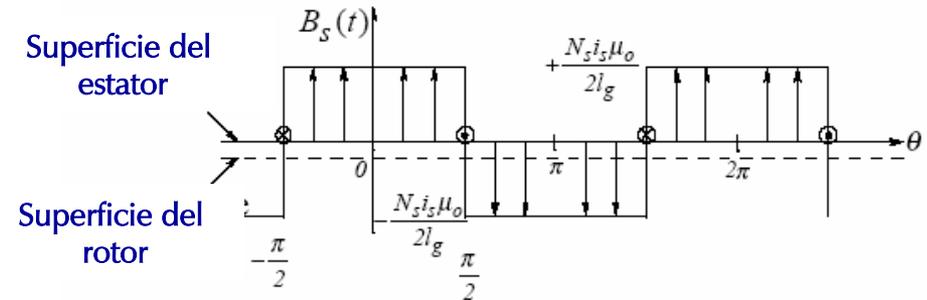
$$F_s = H_s \cdot l_g = N_s \cdot i_s / 2$$

La densidad de flujo en el entrehierro

$$B_s = \mu_0 \cdot H_s = \mu_0 \cdot N_s i_s / (2l_g)$$



Desarrollo lineal del entrehierro



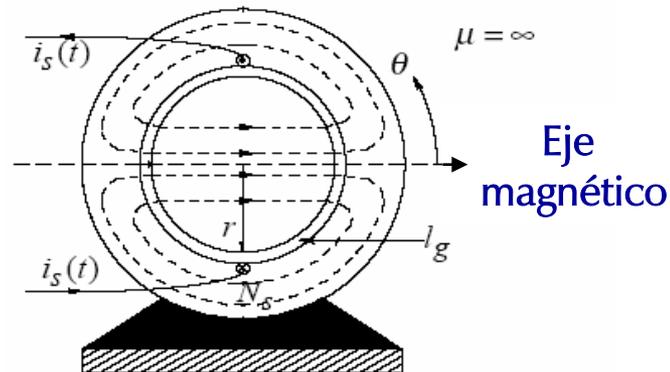
Si sólo considera el campo del estator y se desprecia la dispersión



1.3 Fundamentos Magnéticos

Problema 1.5

(Conceptos básicos de una máquina eléctrica)



Datos

$N = 25$ vueltas
 $l_g = 1$ mm
 $r_g = 15$ cm
 $l = 35$ cm (empilado)
 $i_s(t_0) = 20$ A

Calcular

$H_s(\theta)$, $F_s(\theta)$, $B_s(\theta)$

1º

Calcular

El flujo total que
atraviesa el entrehierro

2º



1.3 Fundamentos Magnéticos

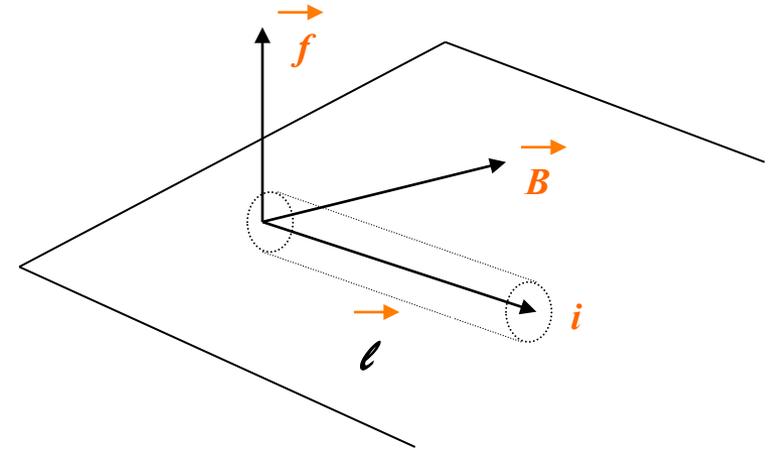
Principios básicos de una máquina eléctrica

1

(Fuerza de Laplace o Lorentz) La fuerza a la que se ve sometido un conductor recorrido por una corriente de módulo i cuando esta inmerso en un campo externo de módulo B es el producto vectorial de ambos vectores:

$$\vec{f} = i_s \vec{\ell} \times \vec{B}_s \underset{(90^\circ)}{=} i_s \ell \vec{B}_s$$

$$\vec{f} = q \vec{u} \times \vec{B}_s$$



2

La fuerza electromotriz inducida en un conductor de longitud ℓ en movimiento (u), inmerso en un campo B uniforme (constante):

$$e = u \ell B_s$$

u = velocidad del conductor

Conductor curvo

$$\vec{f} = i_s \int d\vec{\ell} \times \vec{B}_s$$



1.3 Fundamentos Magnéticos

Aplicación de los principios básicos

Hipótesis

B_s es uniforme y de dirección radial

i_r es constante pero cambia de polaridad con la posición

El par electromagnético T_{em} es positivo con sentido antihorario

La fuerza actuante sobre el conductor

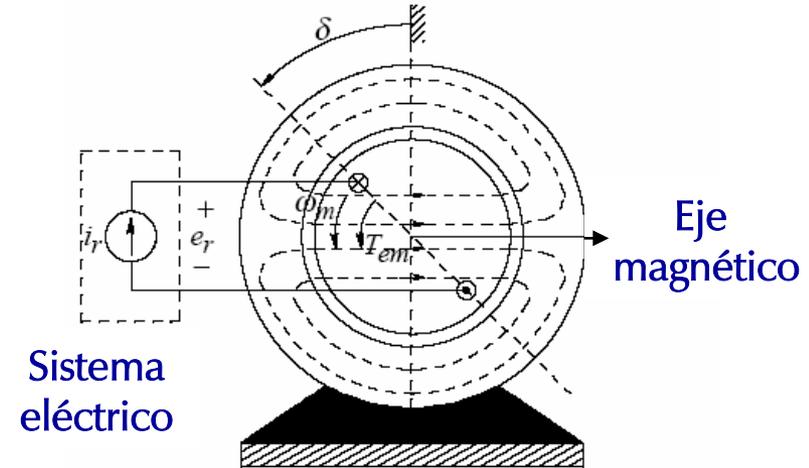
$$f = B_s (N_r I) \ell$$

Par electromagnético

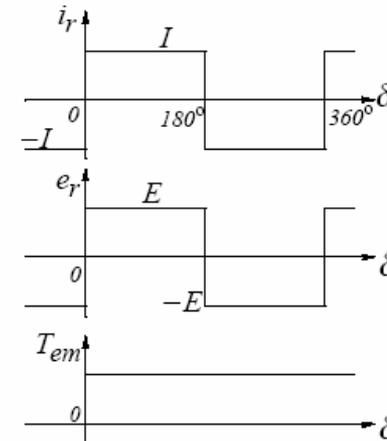
$$T_{em} = 2 f r = 2 B_s (N_r I) \ell r$$

Fuerza electromotriz inducida en la bobina

$$e_r = 2 e_{conductor} = \underbrace{2 N_r}_{\text{Nº de conductores}} (\omega_m r) \ell B_s$$



Desarrollo lineal del entrehierro





CAPÍTULO 1 Aspectos Generales

1.3 Fundamentos Magnéticos



Conversión de energía

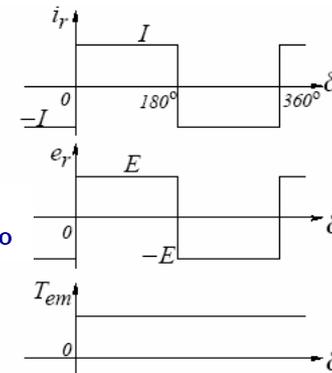
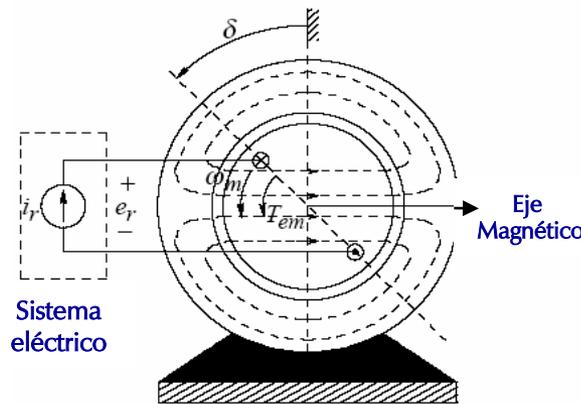
$$P_{el} = e_r i_r = (2 N_r \omega_m r \ell B_g) I$$



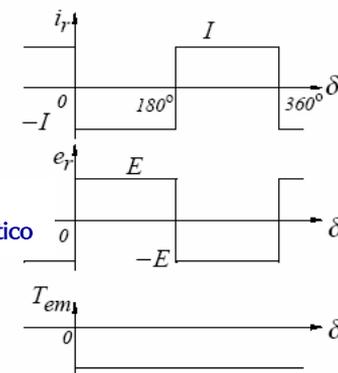
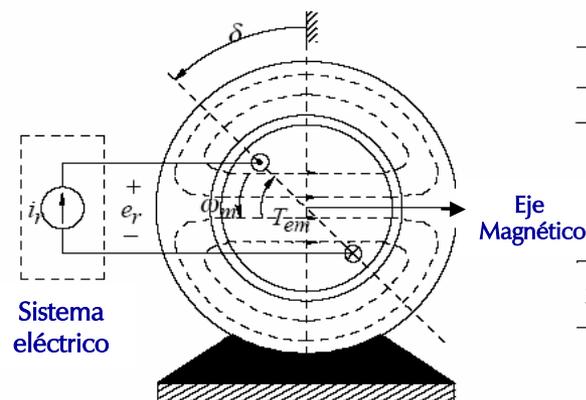
$$P_{mec} = T_{em} \omega_m = (2 B_s N_r I \ell r) \omega_m$$

$$P_{el} = P_{mec} \quad \text{Si no hay pérdidas}$$

Modo Motor



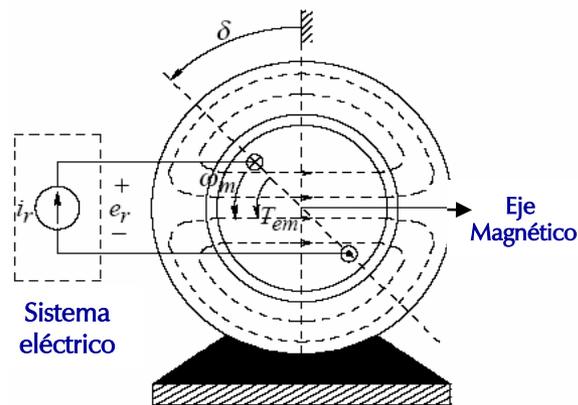
Modo Generador (frenado)





1.3 Fundamentos Magnéticos

Problema 1.6 (Conversión de energía)



Datos

radio= 15 cm
Longitud rotor=35 cm
Bobinado del rotor:
 $N_r=15$ espiras
 $B_s=1.3$ T (uniforme)
 $i_r=10$ A
 $\omega_m= 100$ rad/s

Calcular y dibujar

T_{em} y e_r

1º

Calcular

Potencia

2º



1.3 Fundamentos Magnéticos

Pérdidas de potencia y eficiencia

Pérdidas de la máquina

Pérdidas de conducción
Pérdidas del hierro
Pérdidas de fricción

Pérdidas del CEP

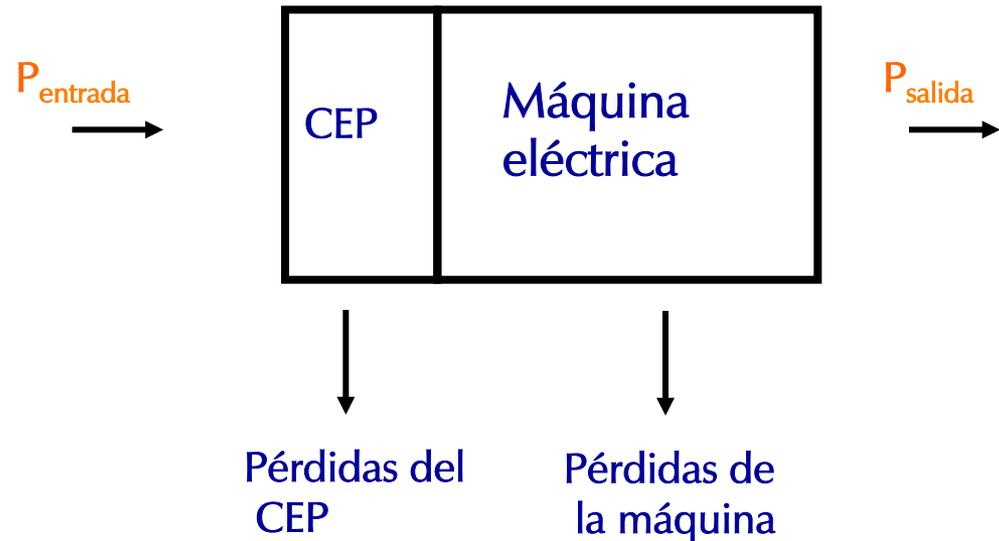
Pérdidas de conducción
Pérdidas de conmutación

$$P_{p\acute{e}rdidas} = P_{Fe} + P_{Joule} + P_{fricci\acute{o}n}$$

$$\eta_{maq} = P_{salida} / P_{entrada} = P_{sal} / (P_{sal} + P_{perd})$$

$$\eta_{tot} = \eta_{CEP} \eta_{maq}$$

Accionamiento eléctrico



CEP (Convertidores de Electrónica de Potencia) es la unidad que gestiona la potencia



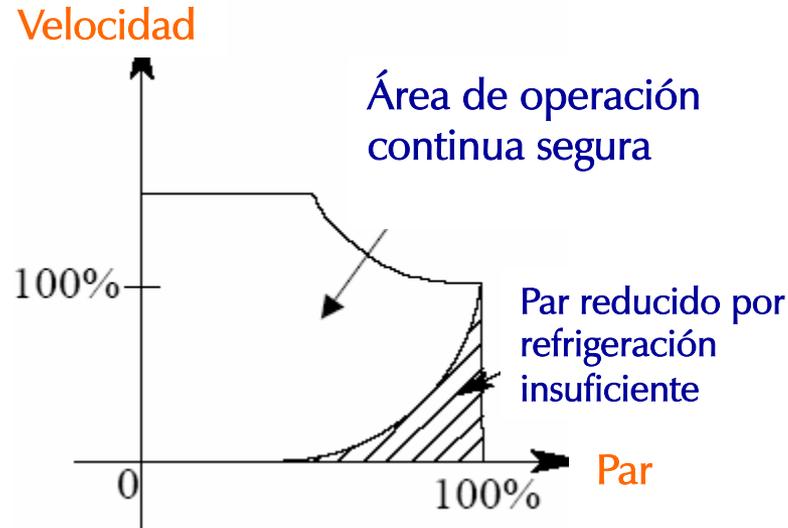
CAPÍTULO 1 Aspectos Generales

1.3 Fundamentos Magnéticos



Clase de la máquina

Área de operación segura



Valores nominales

$$P_{nom} = T_{nom} \omega_{nom}$$

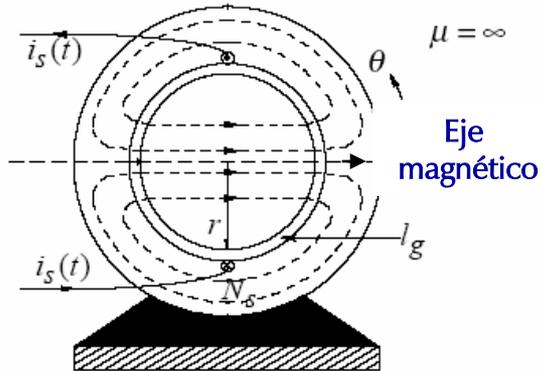
Temperatura de la máquina se eleva debido a las pérdidas

El área de operación segura se expande para transitorios o funcionamiento intermitente

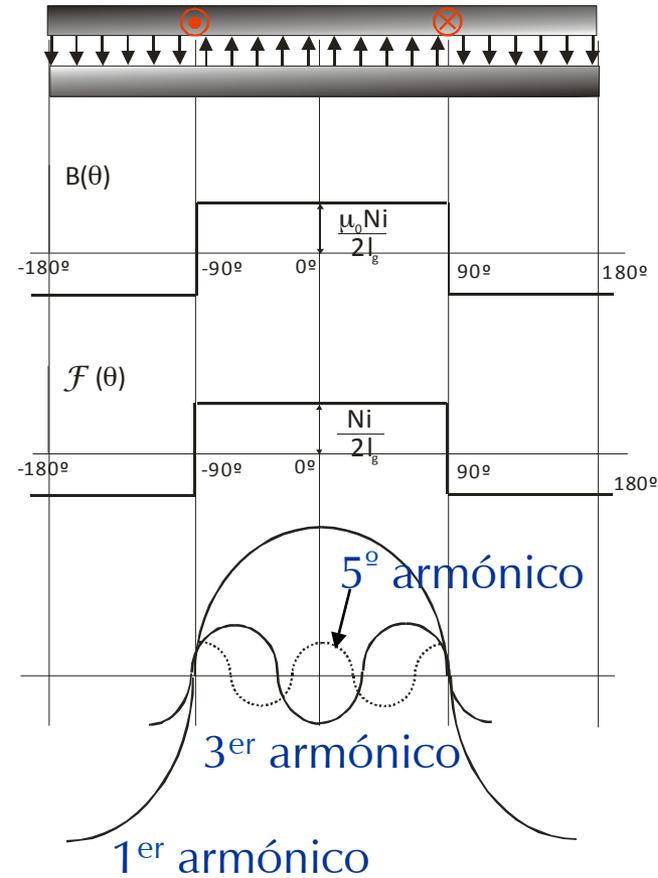


1.3 Fundamentos Magnéticos

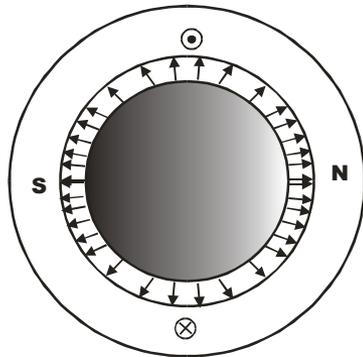
Producción del campo magnético de 1 bobina



Desarrollo lineal del entrehierro



Distribución de la fmm senoidal



Fuerza magnetomotriz



Producción del campo magnético de 1 bobina

Fuerza magnetomotriz

$$F_s(\theta) = F_1 \cos(\theta) + F_3 \cos(3\theta) + F_5 \cos(5\theta) + \dots$$

$$F_s(\theta) = \frac{4N_s i_s}{2\pi} (\cos(\theta) - \frac{1}{3}\cos(3\theta) + \frac{1}{5}\cos(5\theta) + \dots)$$

Onda cuya amplitud varía en el tiempo (pulsante)

$$F_s(\theta, t) = \frac{4N_s I_m}{2\pi} \cos(\omega t) \cos(\theta)$$

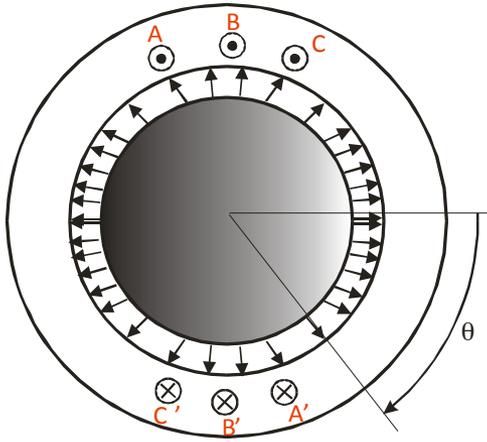
Fuerza magnetomotriz pico

$$H(\theta) = F_s(\theta, t) / l_g$$

$$B(\theta) = \mu_0 H(\theta)$$

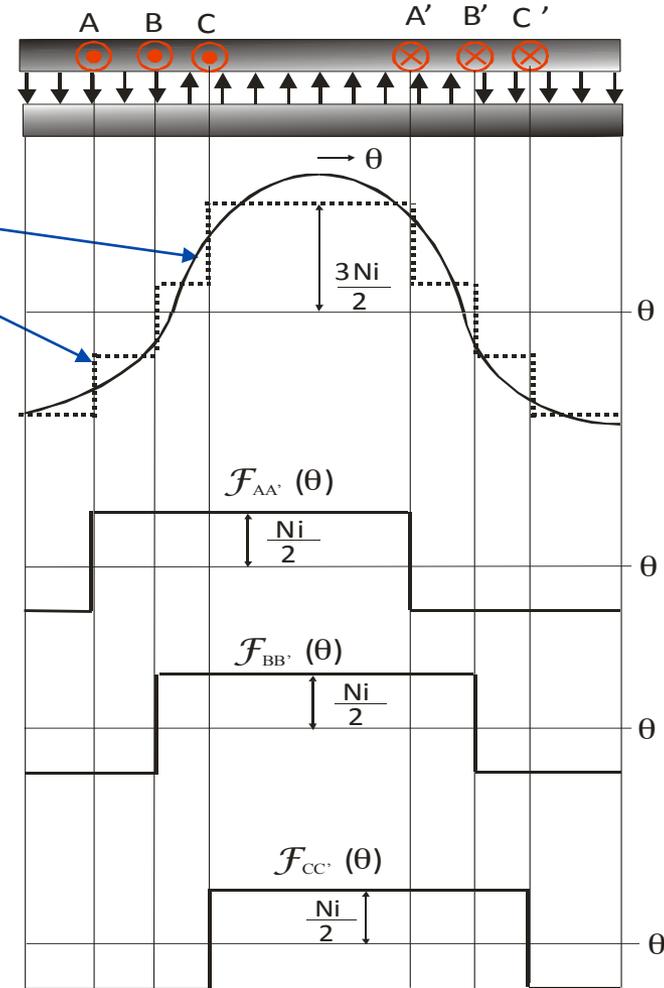
1.3 Fundamentos Magnéticos

Fuerza magnetomotriz producida por un devanado distribuido (3 bobinas)



3 bobinas de N espiras y corriente i conectadas en serie

1^{er} armónico
fmm resultante



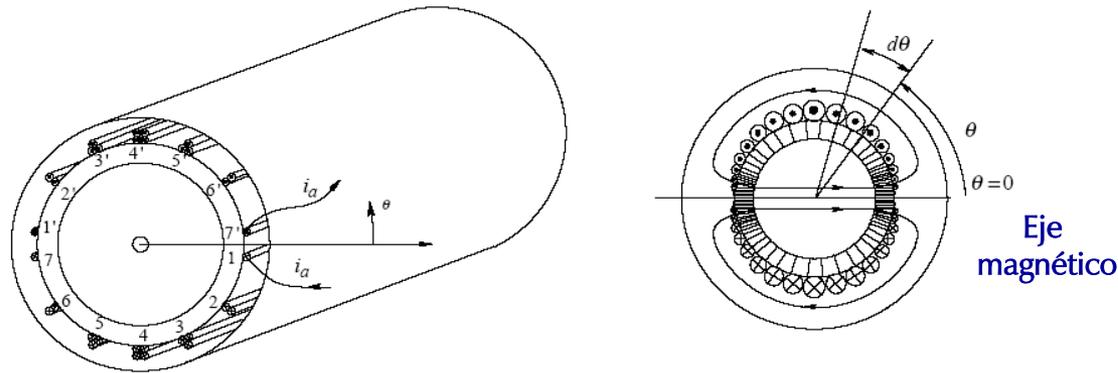
Una mejor calidad de onda de f.m.m se traducirá en una f.e.m inducida en las bobinas más sinusoidal



1.3 Fundamentos Magnéticos

Producción del campo magnético por un devanado distribuido (1 bobina)

Fuerza magnetomotriz producida por un devanado distribuido



$$F_s(\theta, t) = F_m \cos(\omega t) \cos(\theta)$$

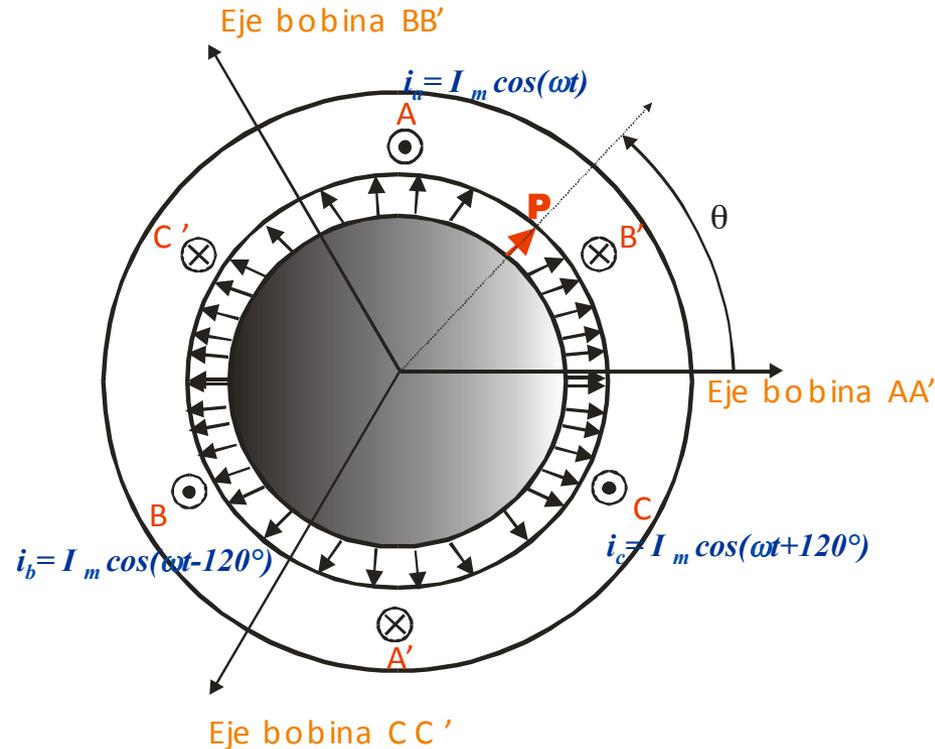
$$F_m = \frac{4 K_d}{\pi} \frac{3 N_s}{2} I_m$$

Fuerza magnetomotriz pico



1.3 Fundamentos Magnéticos

Fuerza magnetomotriz producida por un devanado trifásico.
Campos giratorios. Teorema de Ferraris.



$$F_a(\theta, t) = F_m \cos(\omega t) \cos(\theta)$$

$$F_b(\theta, t) = F_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$F_c(\theta, t) = F_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)$$

$$F_P(\theta, t) = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t)$$

$$F_P(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta)$$

3 devanados desfasados en el espacio 120°

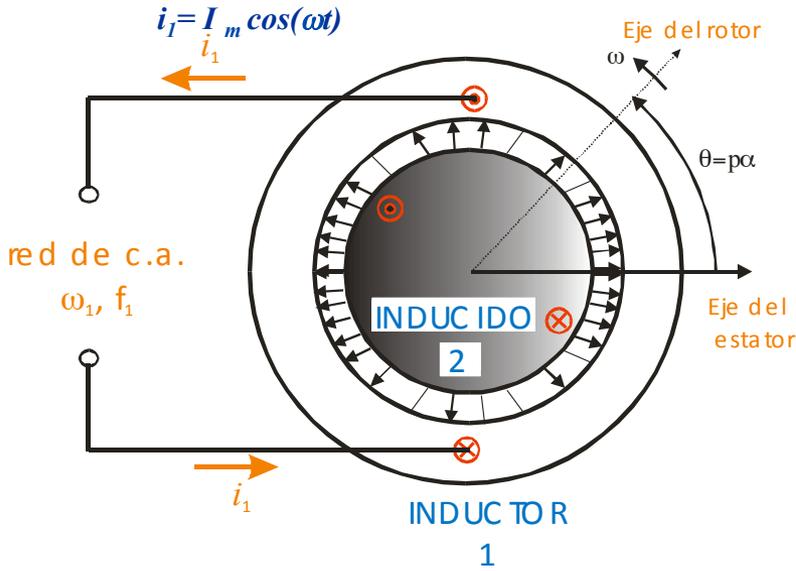
<http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm#comienzo>

La fmm o campo magnético del entrehierro tiene una amplitud constante y gira a una velocidad constante



1.3 Fundamentos Magnéticos

Fuerza electromotriz inducida en un devanado de una máquina eléctrica



En los devanados de las máq. Eléctricas se inducen fems debidas a las variaciones del flujo enlazado por los arrollamientos. Estas variaciones de deben a:

- Variación con el tiempo de la magnitud del flujo
- Movimiento del circuito inducido respecto al flujo
- Combinación de los casos anteriores

1- Inducido fijo ($\Omega_2 = d\alpha/dt = 0$) flujo variable (trafos)

$$e_2 = N_2 \omega_1 \Phi_m \text{sen}(\omega_1 t) \text{cos}(p\alpha)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f_1 \Phi_m$$

2- Inducido móvil flujo constante ($\omega_1 = 0$) (m. síncronas)

$$e_2 = N_2 p \Omega_2 \Phi_m \text{sen}(p\alpha)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f_2 \Phi_m$$

$$\Phi_1(\theta, t) = \Phi_m \text{cos}(\omega t) \text{cos}(p\alpha)$$

$$e_2(\theta, t) = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$\omega_2 = \omega_1 + p\Omega$$

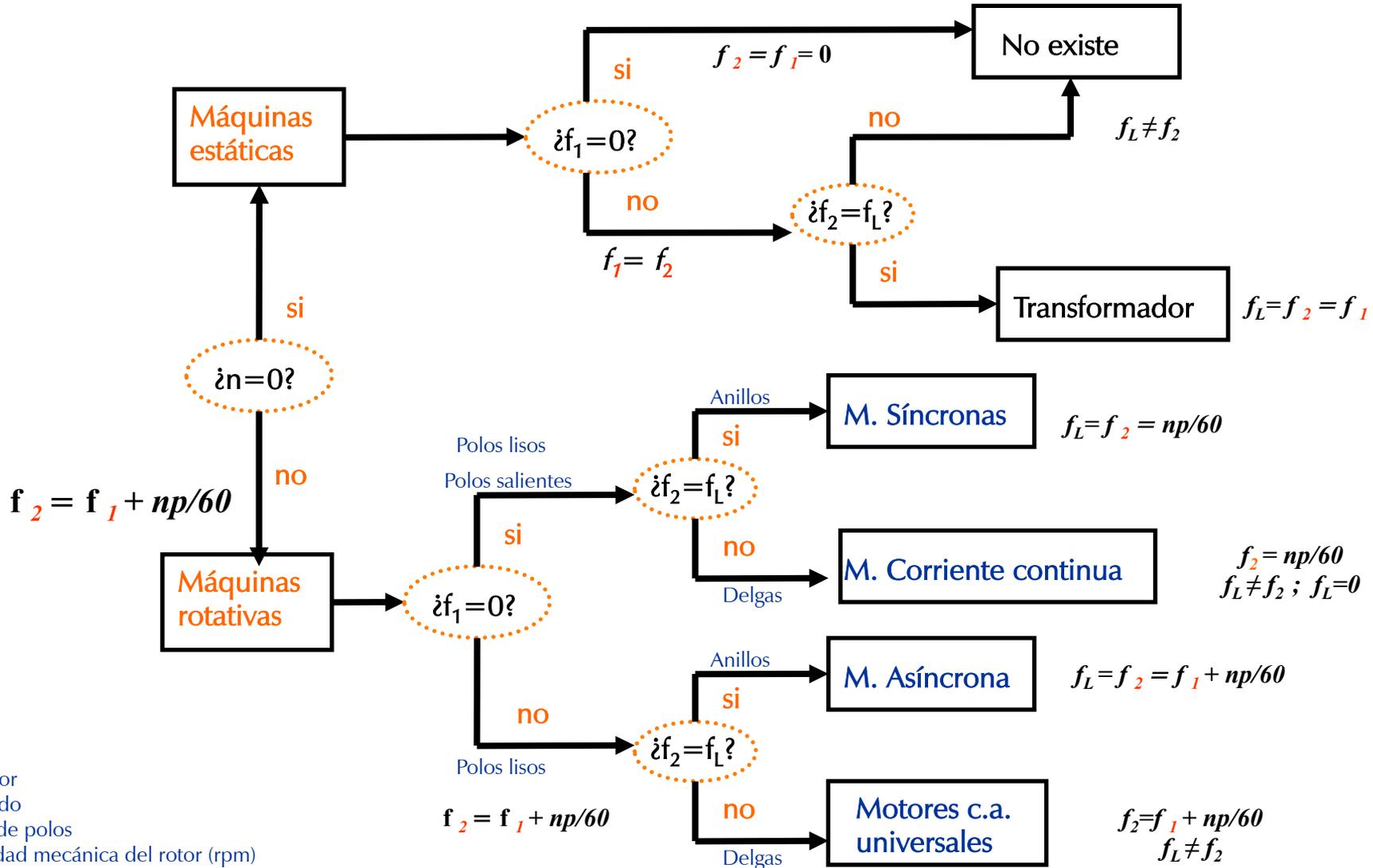
p: pares de polos

Ω : velocidad mecánica del rotor (rad/s)

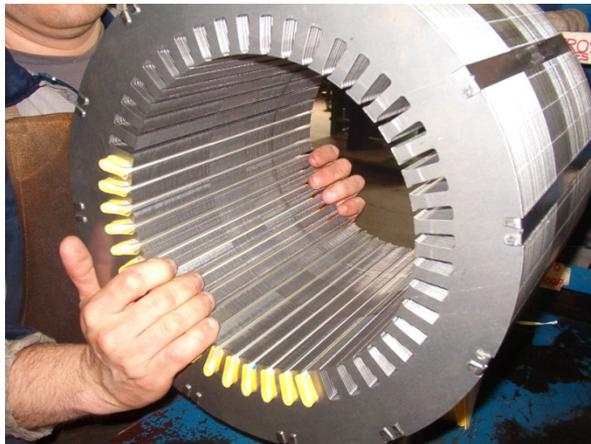
La fem viene afectada por unos coeficientes o factores que tienen en cuenta la forma real del flujo y la distribución del devanado

1.3 Fundamentos Magnéticos

Clasificación general de las máquinas eléctricas



1: inductor
 2: inducido
 p: pares de polos
 n: velocidad mecánica del rotor (rpm)
 fL: frec. Del circuito exterior



Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna | David Santos