



UNIVERSIDADE
DE VIGO

TEORÍA GENERAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Características generales y específicas de las ME

Manuel Pérez Donsión

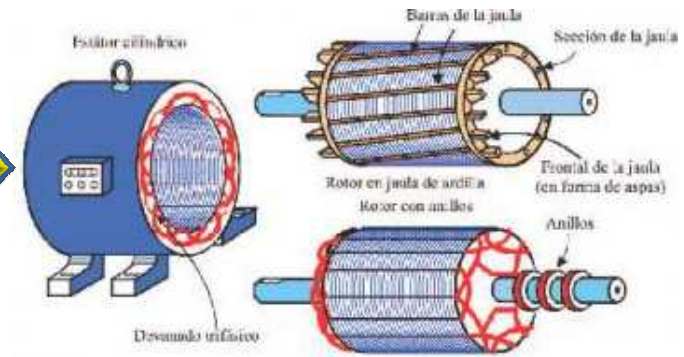
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

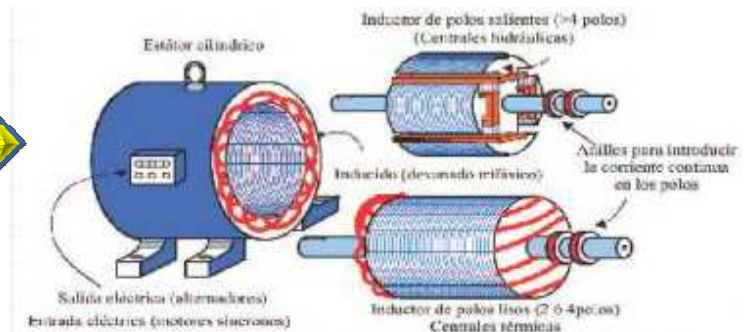
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. CLASIFICACIÓN

De corriente alterna

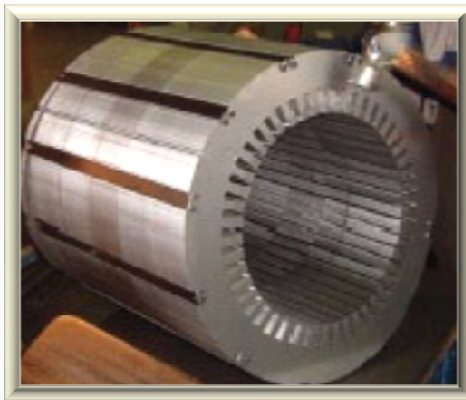
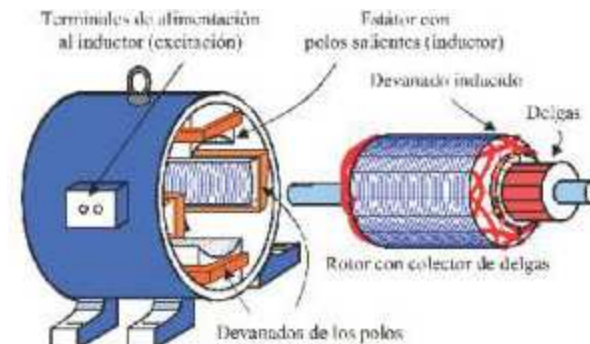
asíncronas



síncronas



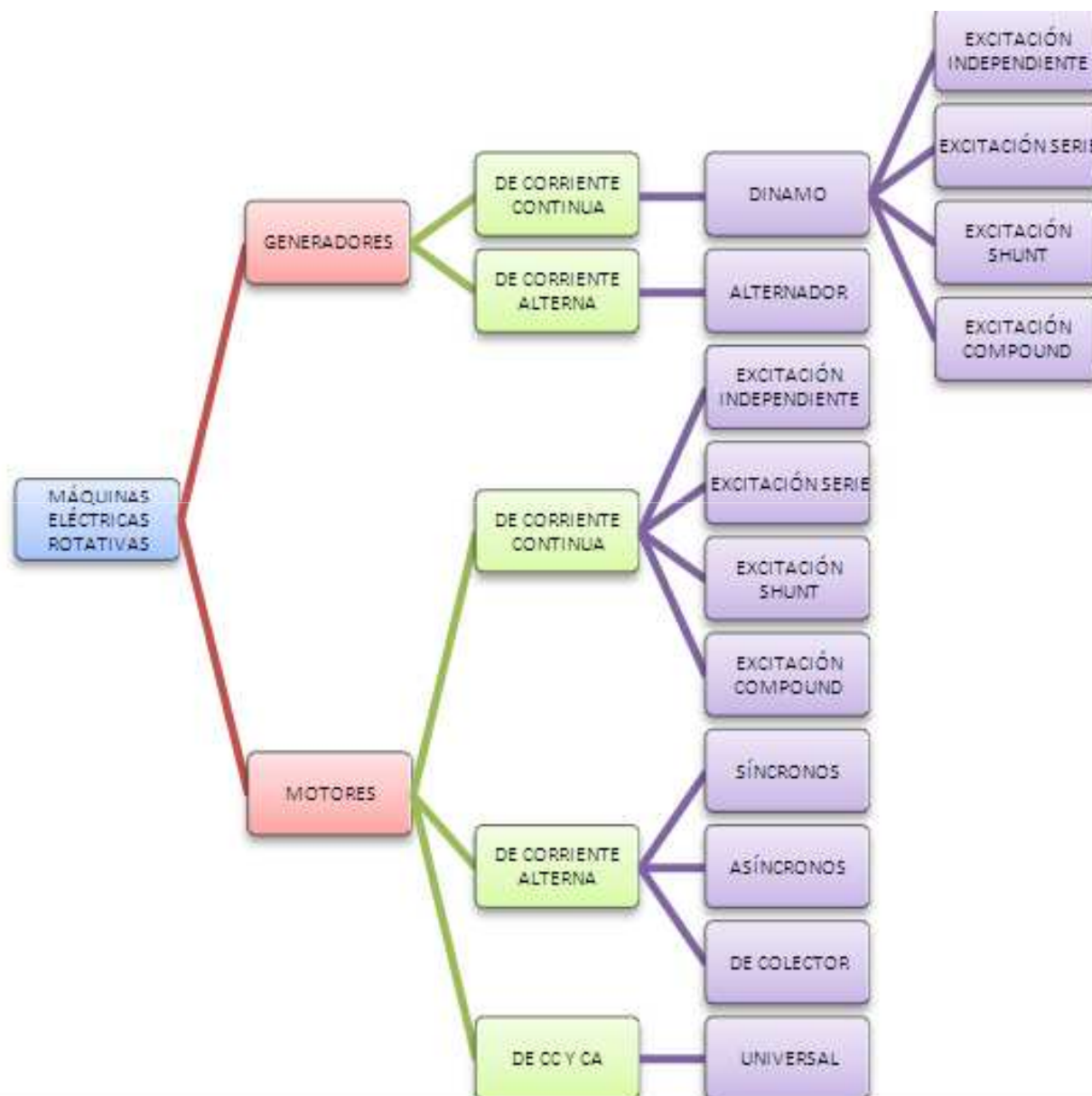
De corriente continua



MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. CLASIFICACIÓN

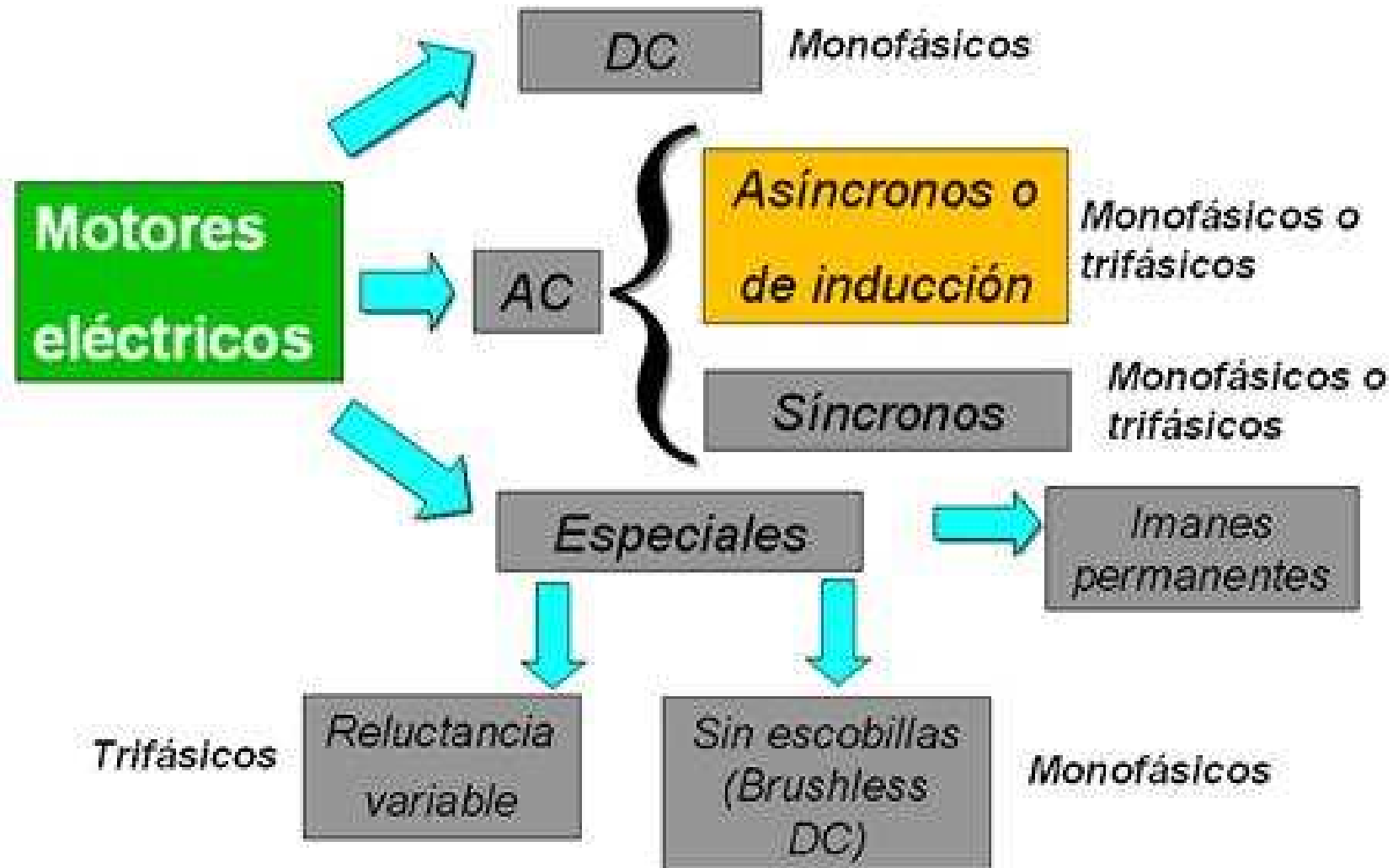
Tipo de corriente Máquina eléctrica	Corriente continua	Corriente alterna
Generadores	Dinamo (con excitación) - Independiente - Serie - Shunt o derivación - Compound	Alternador - Monofásico - Trifásico - Polos lisos - Polos salientes
Motores	Motor (con excitación) - Independiente - Serie - Shunt o derivación - Compound	Monofásicos - Inducción - Jaula - Fase partida - Condensador - Espira de sombra - Rotor devanado - Repulsión - Repulsión en arranque - Repulsión-inducción - Síncrono - Histéresis - Reluctancia - Imán permanente Polifásicos - Inducción - Jaula de ardilla - Rotor devanado Universales - Síncronos

MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. CLASIFICACIÓN



Fuente: Junta de Andalucía

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

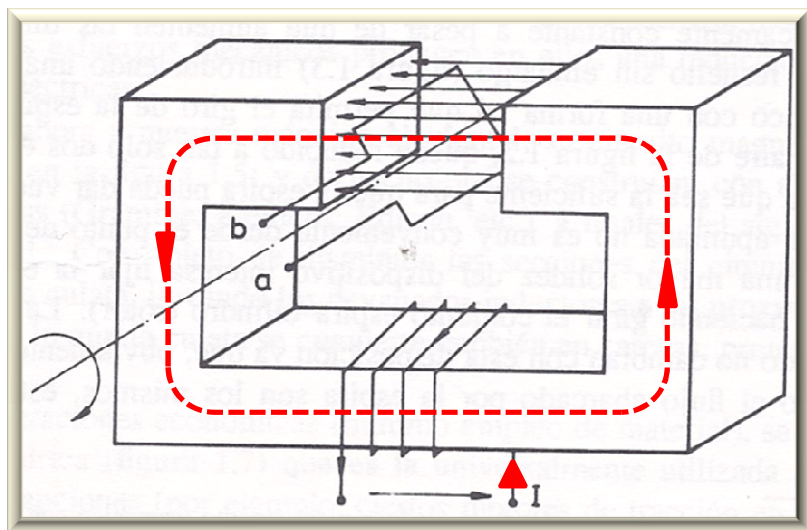


DEVANADOS PRINCIPALES DE LAS MAQUINAS ELÉCTRICAS

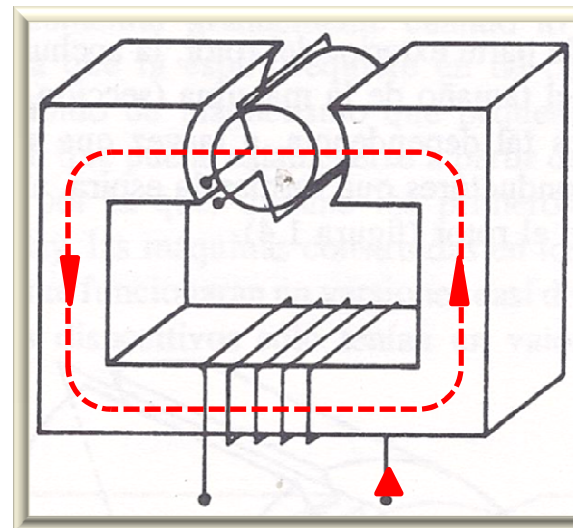
DEVANADO QUE CREA EL CAMPO MAGNÉTICO  **INDUCTOR**
DEVANADO ASIENTO DE EFECTOS (E,F)  **INDUCIDO**

- El devanado **INDUCTOR** puede estar en el **ROTOR** o en el **ESTATOR**
- El devanado **INDUCIDO** puede estar en el **ROTOR** o en el **ESTATOR**
- Si en una ME el devanado **INDUCTOR** esta, por ejemplo, en el **ESTATOR** el devanado **INDUCIDO** estará en el **ROTOR** y viceversa
- Dependiendo del tipo de máquina eléctrica (ME), por razones constructivas o de funcionamiento, suele haber una disposición determinada de ambos devanados que suele ser la más habitual
- Dependiendo del tipo de ME por el devanado **INDUCTOR** puede circular **cc o ca**
- Dependiendo del tipo de ME por el devanado **INDUCIDO** puede circular **cc o ca**
- Algunas ME especiales, o algunas clásicas de pequeña potencia, no llevan devanado inductor y el campo magnético es producido por un **IMAN PERMANENTE**

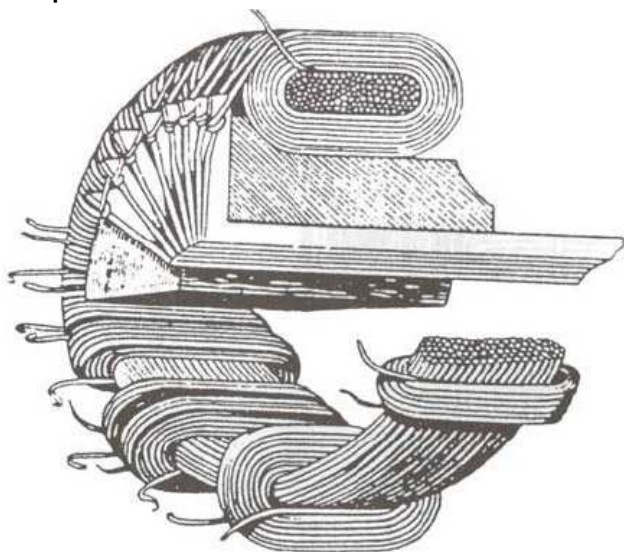
EVOLUCIÓN DEL CIRCUITO MAGNÉTICO



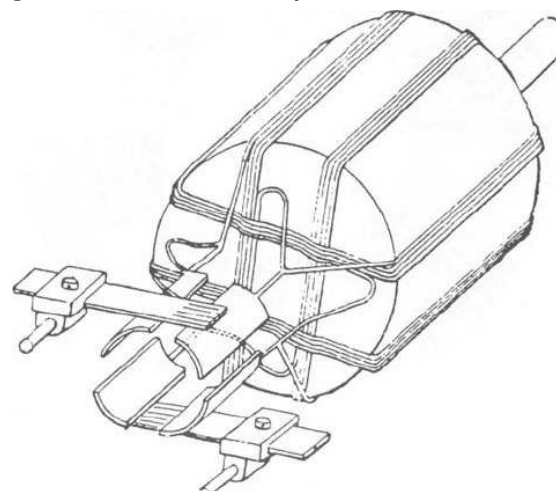
1. Máquina eléctrica rotativa elemental



2. Introducir un núcleo magnético para el rotor para, de esta manera, reducir la reluctancia del circuito magnético de la máquina elemental 1

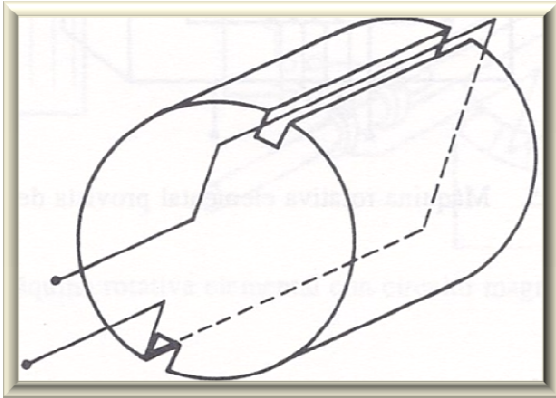


3. Colocar en el rotor un bobinado en anillo de Gramme (1871)

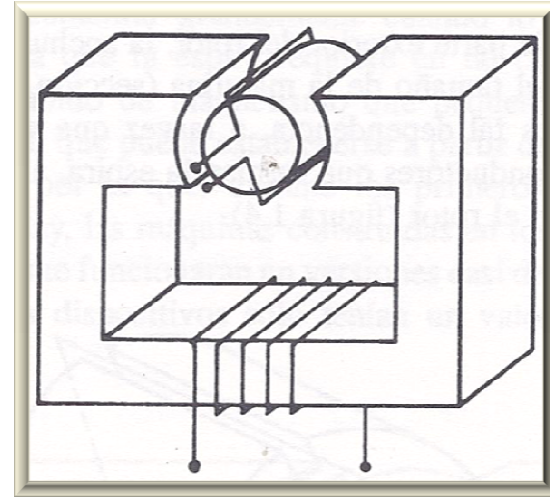


4. Colocar en el rotor un bobinado de tambor. En este caso con solo 4 bobinas

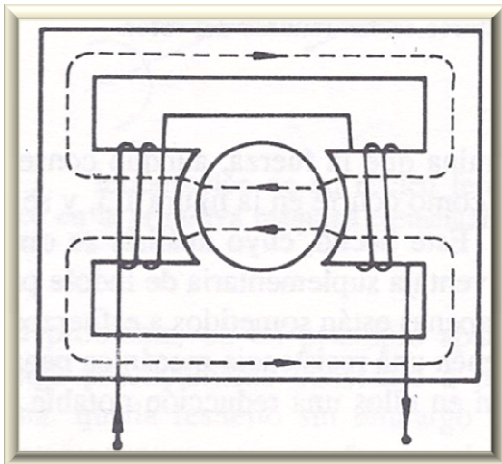
EVOLUCIÓN DEL CIRCUITO MAGNÉTICO



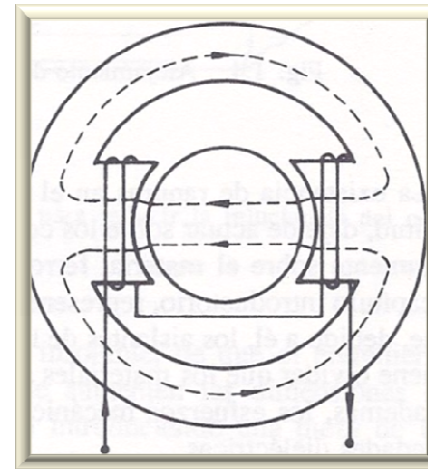
5. Realizar ranuras en el rotor para colocar en ellas los conductores confiriéndole un mejor comportamiento mecánico



6. Máquina rotativa con un estator elemental



7. Modificación del circuito magnético para reducir las secciones de material magnético y proteger las partes giratorias.



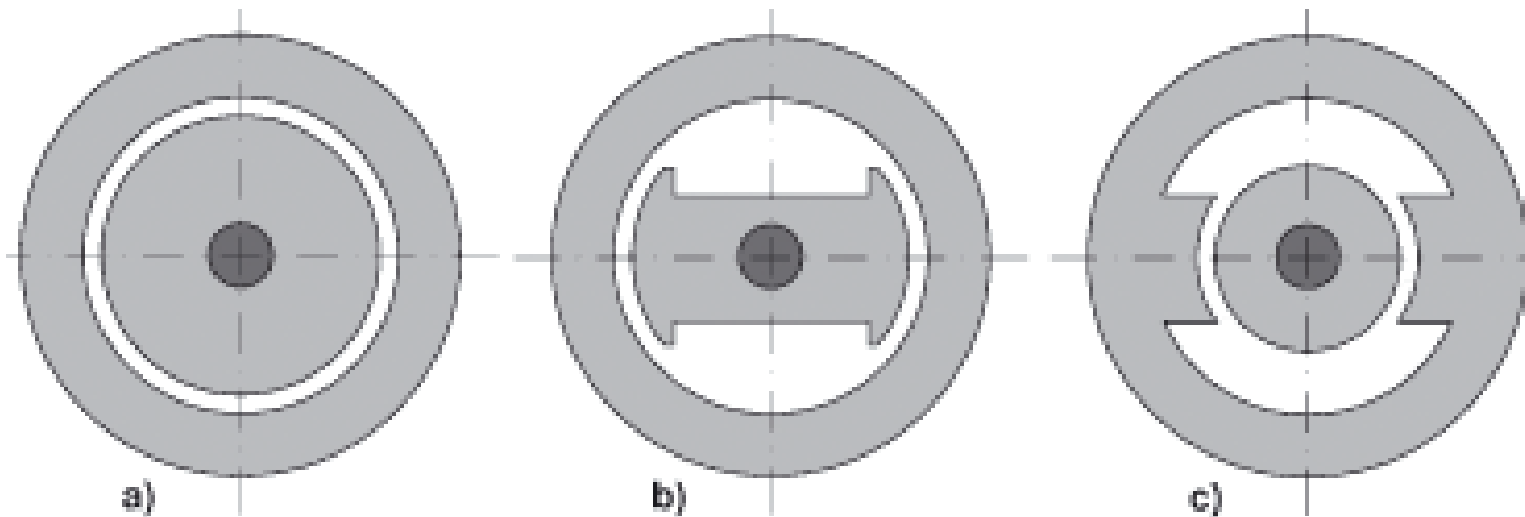
8. Forma del circuito magnético característico de la mayoría de las máquinas actuales

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Configuraciones básicas

Las maquinas eléctricas rotativas adoptan tres formas básicas :

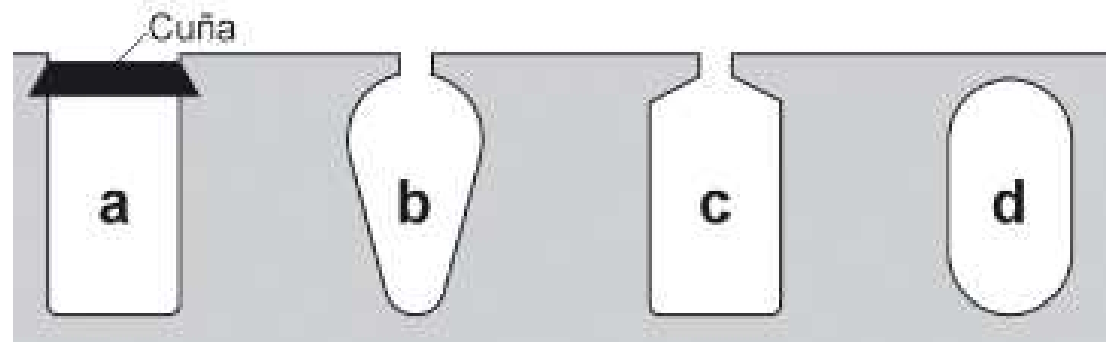
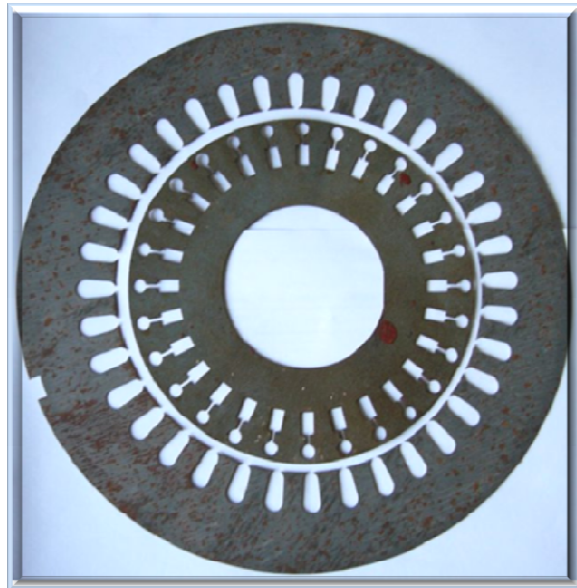
- ✚ Estator y rotor cilíndricos (Fig.a), siendo su entrehierro uniforme. Es la habitualmente empleada en las maquinas asíncronas y síncronas rápidas.
- ✚ Estator cilíndrico y rotor de polos salientes (Fig. b), usualmente utilizada en las maquinas síncronas lentas.
- ✚ Estator de polos salientes y rotor cilíndrico (Fig. c), normalmente usada en las maquinas de corriente continua.



CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Cuando el núcleo magnético no es de polos salientes, la superficie enfrentada al entrehierro es cilíndrica y posee una serie de **ranuras** donde se alojan los devanados.

Las **ranuras abiertas (a)** tienen sus flancos paralelos, por lo que dan lugar a dientes trapeziales. Este ranurado permite preparar el bobinado totalmente acabado en una bobinadora e introducir luego las bobinas enteras en las ranuras. A continuación estas se cierran mediante cuñas.

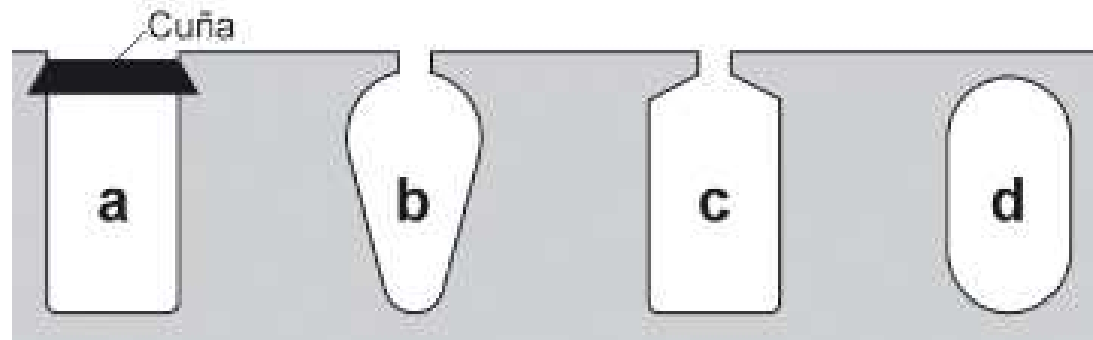


Fuente: Miguel A. Rodríguez Pozueta

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Las **ranuras semicerradas (b y c)** se comunican con el entrehierro por medio de una estrecha abertura. En máquinas pequeñas si fueran de flancos paralelos darían lugar en el rotor a dientes con una base demasiado estrecha que los haría mecánicamente débiles. Para evitarlo las ranuras se redondean en sus zonas inferior y superior. En estas ranuras el devanado se coloca haciendo pasar los hilos uno por uno a través de la garganta de la entrada. Aquí, al igual que en las ranuras abiertas, una cuña de material aislante sirve de cierre de la abertura de la ranura.

Las **ranuras cerradas (d)** se usan casi exclusivamente en los devanados de jaula de ardilla. En este caso los devanados se construyen con barras que se introducen en las ranuras por un costado y luego se unen a los anillos de cortocircuito con soldaduras, remaches o tornillos.



Clasificación y detalles diferenciales de las máquinas eléctricas

Según la excitación

- Máquinas excitadas por corriente continua (cc), síncronas
- Máquinas excitadas por corriente alterna, asíncronas:
 - i. De jaula de ardilla.
 - ii. De rotor bobinado.
- Máquinas de corriente continua excitadas por cc

M. ASÍNCRONAS



Corriente alterna en los devanados del estator y del rotor (INDUCTOR E INDUCIDO).

La velocidad será casi constante
"característica dura".

M. SÍNCRONAS



Corriente continua en el devanado inductor y corriente alterna en el devanado inducido. Normalmente (grandes máquinas) inductor en el rotor e inducido en el estator

Su velocidad de giro es constante.

M. DE CONTINUA

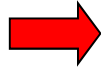


Corriente continua en el devanado inductor (estator, polos salientes) y en el devanado inducido (rotor) dentro ca no senoidal y fuera cc (gracias al colector de delgas)

La velocidad será función del tipo de excitación

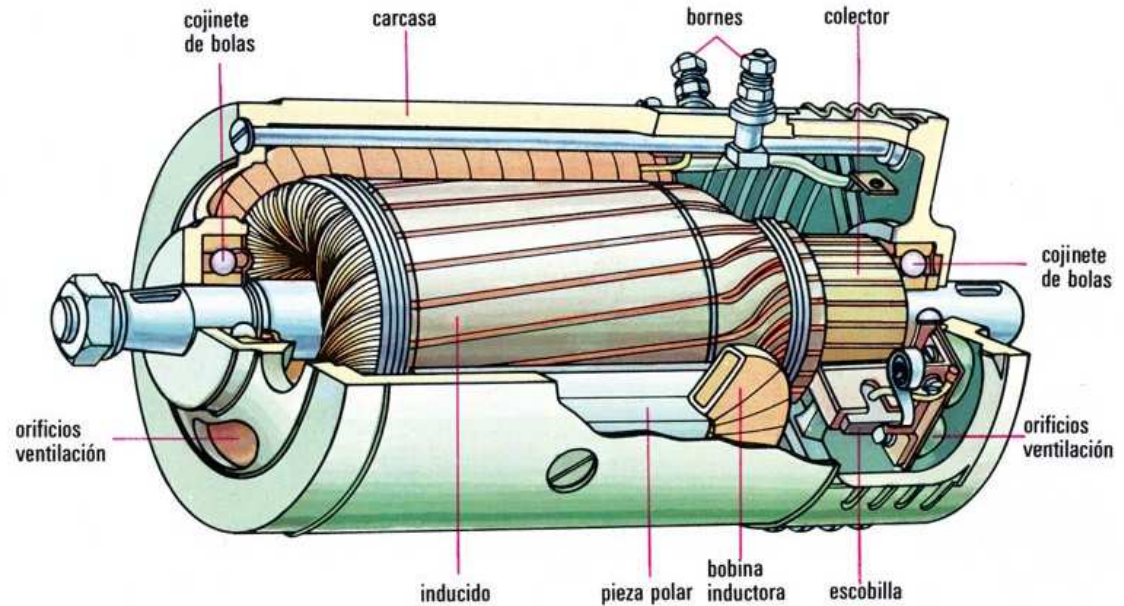
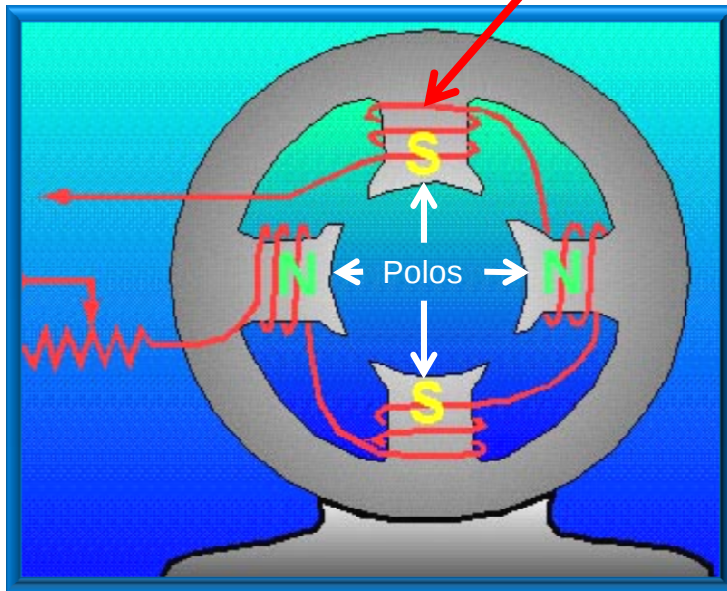
Clasificación y detalles diferenciales

M. DE CONTINUA



- El estator no es uniforme ya que lleva unas expansiones polares que configuran los polos principales, cuyo número siempre será par y en torno a los cuales se dispondrá el devanado **INDUCTOR** de la máquina.
- El devanado **INDUCIDO** se localiza en un rotor ranurado y por el mismo, interiormente, circulara corriente alterna no senoidal y será el **COLECTOR DE DELGAS**, funcionando como rectificador (en generadores) el que la transforma en continua, de tal manera que en bornes de la máquina la tensión será siempre continua.

Devanado inductor



Velocidad síncrona

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

- n_s = velocidad de sincronismo (r.p.m)
- f = frecuencia de la corriente de alimentación (Hz).
- p = número de pares de polos de la máquina.

M. SINCRONA



$$n_r = n_s$$

n_r = velocidad de giro del rotor

M. ASINCRONA



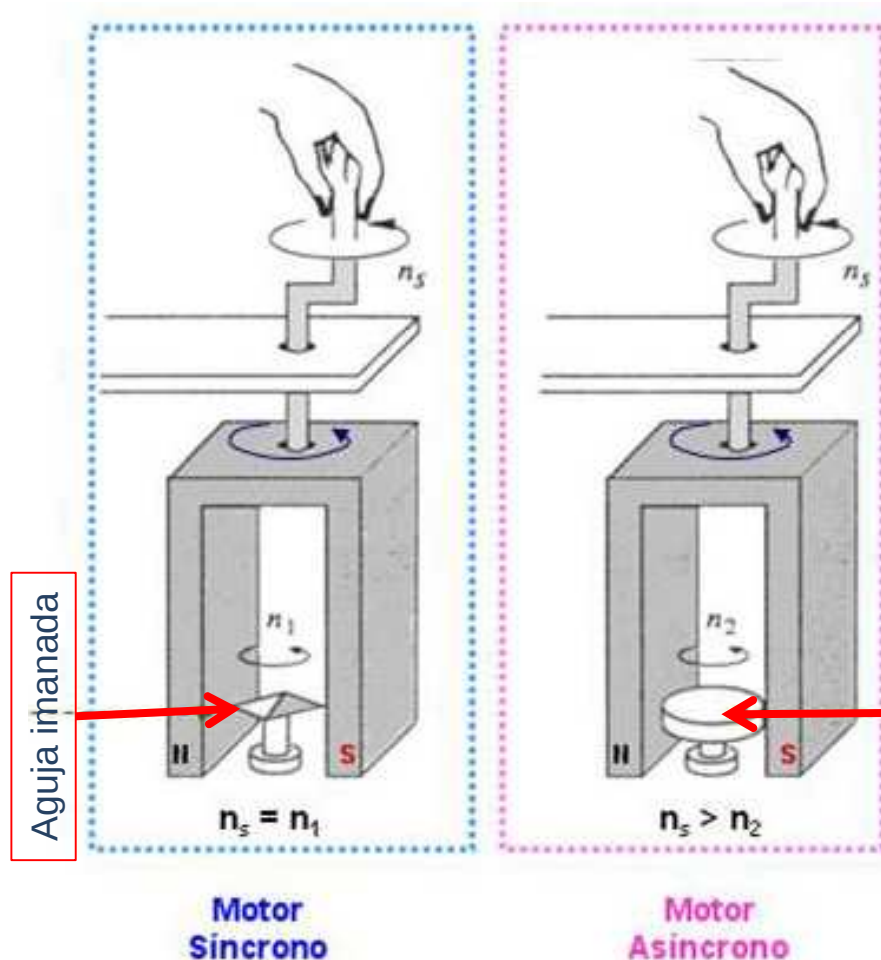
$$n_r \neq n_s$$



$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100$$

s = deslizamiento

Principio de funcionamiento de los motores síncronos y asíncronos

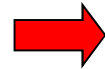


► Si hacemos girar un imán en forma de U a la velocidad n_s alrededor de un aguja imanada, esta girará a una velocidad $n_1 = n_s$ ► **MOTOR SÍNCRONO.**

► Si hacemos girar un imán en forma de U a la velocidad n_s alrededor de una masa metálica circular, esta girará a una velocidad $n_2 < n_s$ ► **MOTOR ASÍNCRONO.**

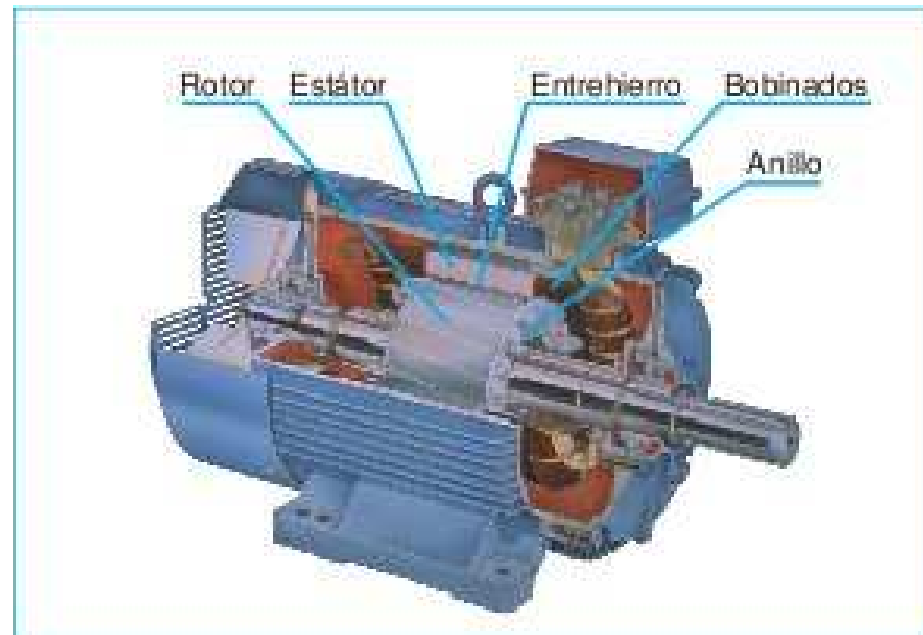
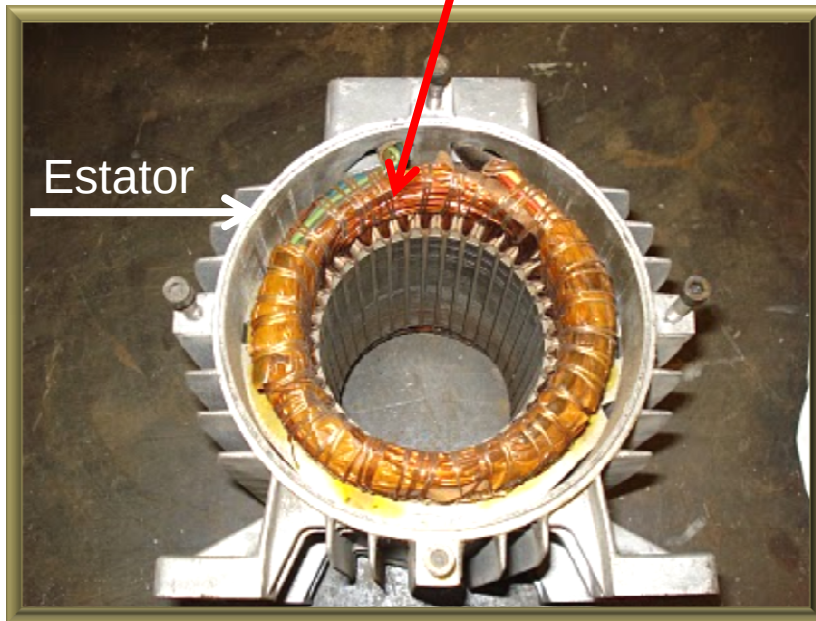
Clasificación y detalles diferenciales

M. ASÍNCRONAS



- No hay una distinción clara entre devanado inductor e inducido pues ambos devanados contribuyen a la excitación del campo magnético.
- Se puede establecer una analogía entre la máquina asíncrona y el transformador. Atendiendo a esto se distinguirán los devanados como: devanado inductor (**primario**) y devanado inducido (**secundario**).
- Por lo general se colocara el devanado primario en el estator y el secundario en el rotor.
- Las máquinas asíncronas pueden ser monofásicas o trifásicas

Devanado primario



Clasificación y detalles diferenciales

M. SÍNCRONAS

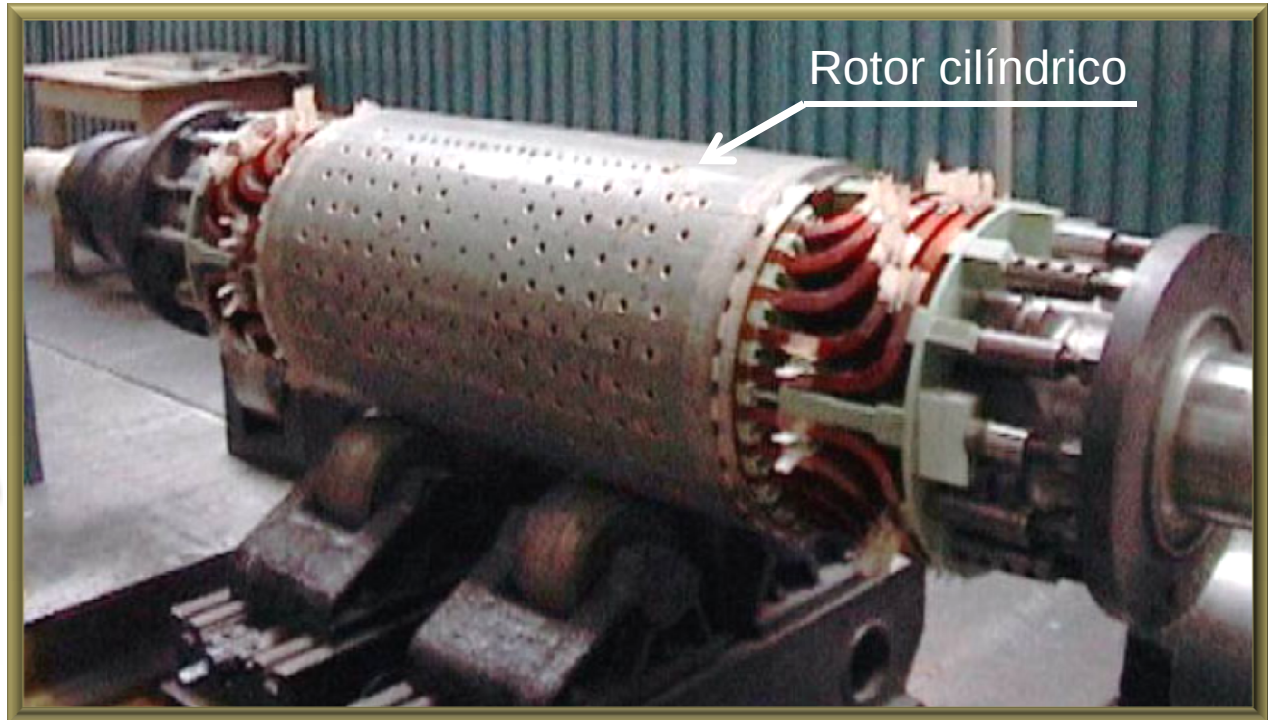


- El inducido se aloja en el estator y esta constituido por bobinas situadas en la superficie cilíndrica externa.
- El inductor esta en el rotor y su circuito magnético puede ser de **polos salientes** o **cilíndrico**. El de rotor cilíndrico es característico de máquinas de alta velocidad (**turbo**).

Rotor de polos salientes



Rotor cilíndrico

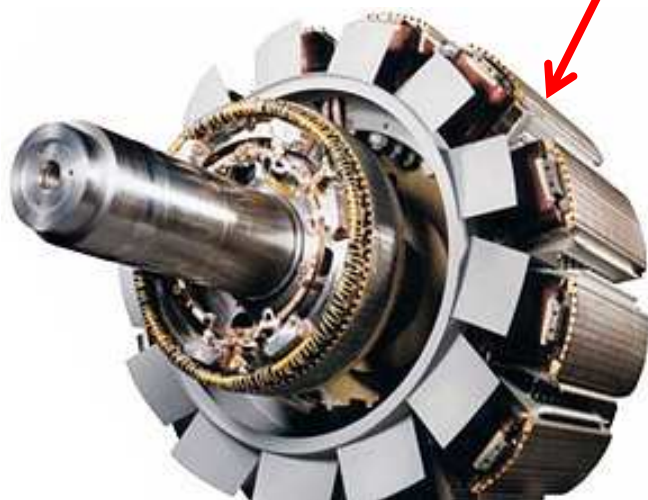


Clasificación y detalles diferenciales

M. SÍNCRONAS



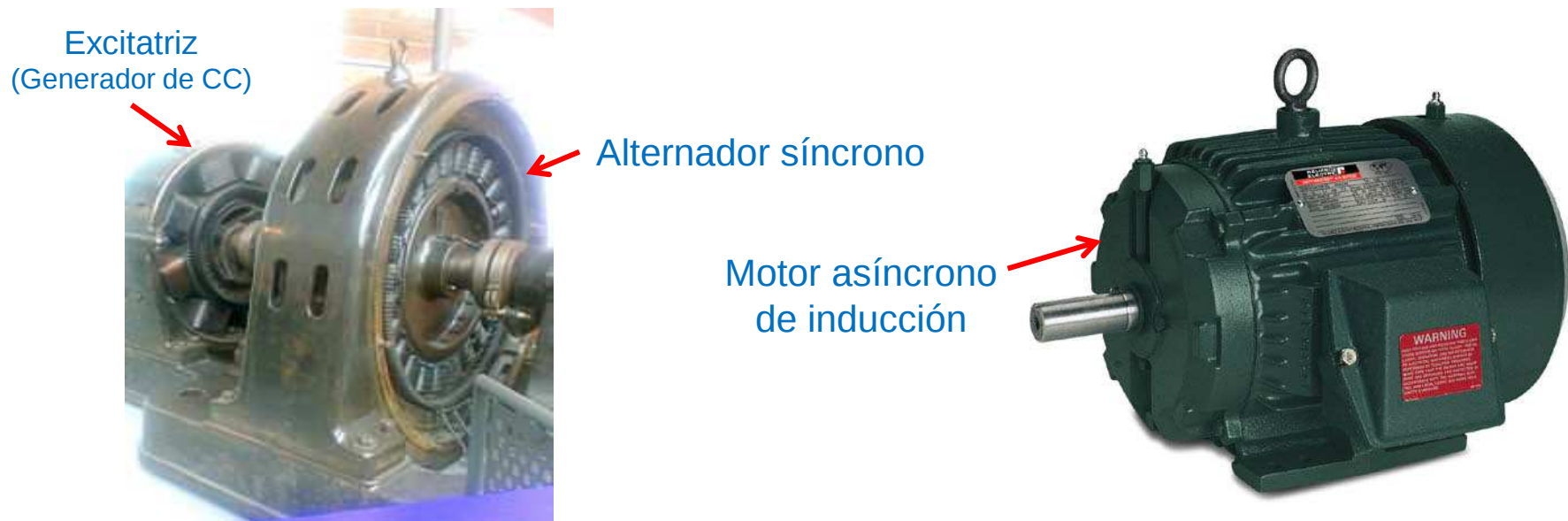
Rotor de polos salientes



Aplicaciones: M.asíncronas – M. síncronas

Todas las máquinas eléctricas rotativas cumplen con el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que **son reversibles**; lo que significa, que pueden trabajar tanto como motor o como generador.

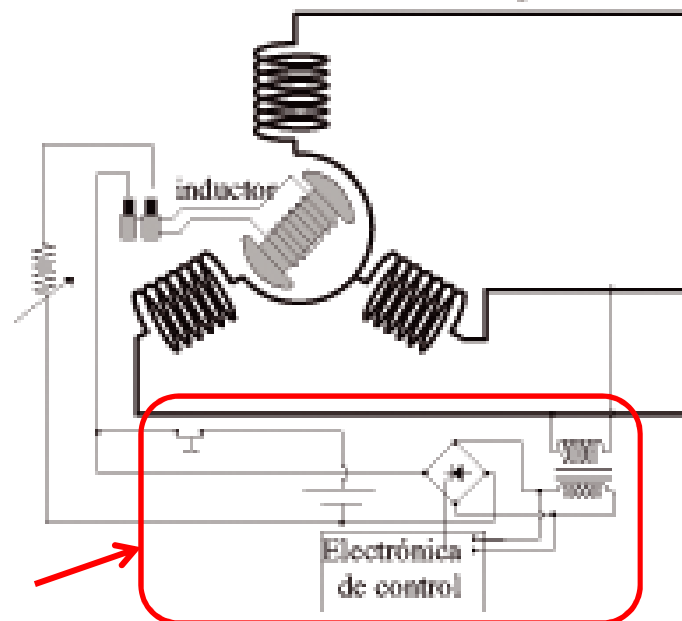
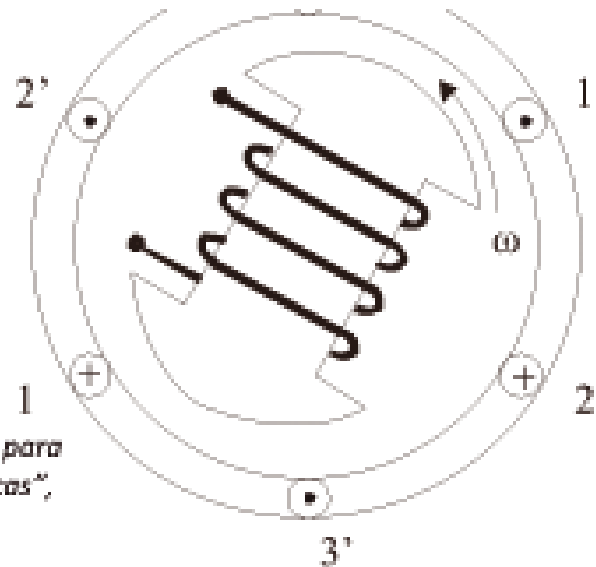
Sin embargo, en la práctica, por ejemplo las **máquinas asíncronas** o de inducción trifásicas generalmente se les utiliza más como **motores**. En cambio las **máquinas eléctricas síncronas**, generalmente se utilizan mucho más como **generadores (alternadores)**.



EL GENERADOR SÍNCRONO. Excitación estática

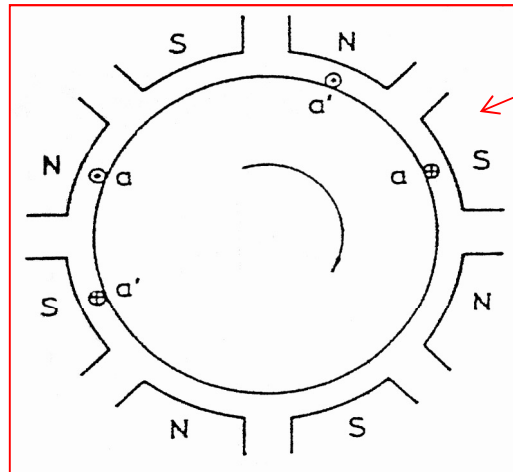
$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas",
Marcombo



Excitación estática

EL GENERADOR SÍNCRONO



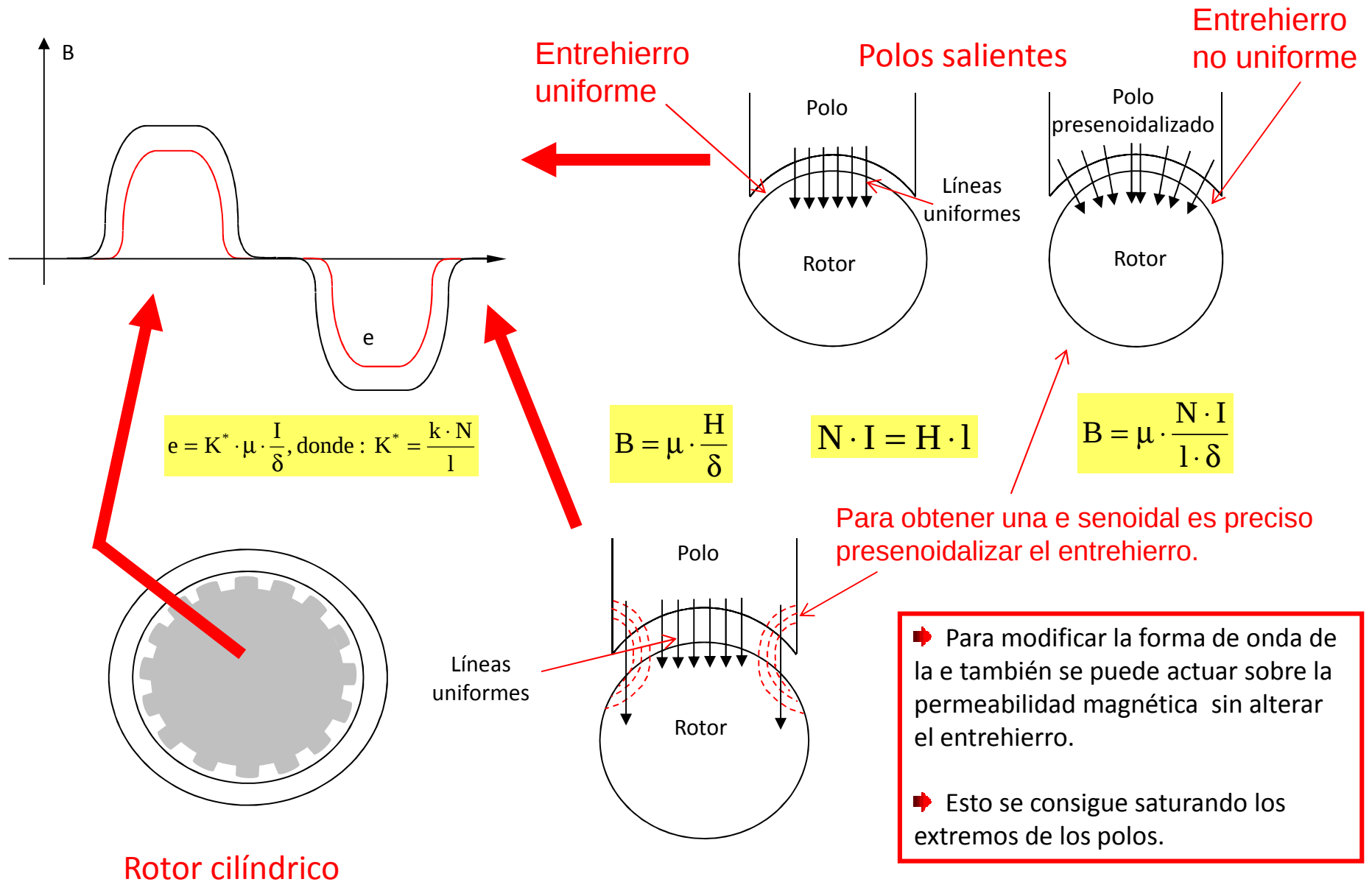
Máquina síncrona de pequeña potencia con el inductor en el estator

➤ La velocidad de giro, dado un número de polos, esta prefijada por la frecuencia de la red.

$$n_r = n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \Rightarrow \begin{cases} \text{Si } p = 1, \text{ dos polos} \Rightarrow n_s = 3000 \text{ r.p.m.} \\ \text{Si } p = 2, \text{ cuatro polos} \Rightarrow n_s = 1500 \text{ r.p.m.} \\ \text{Si } p = 4, \text{ ocho polos} \Rightarrow n_s = 750 \text{ r.p.m.} \end{cases}$$

Si $f = 50 \text{ Hz}$

EL GENERADOR SÍNCRONO



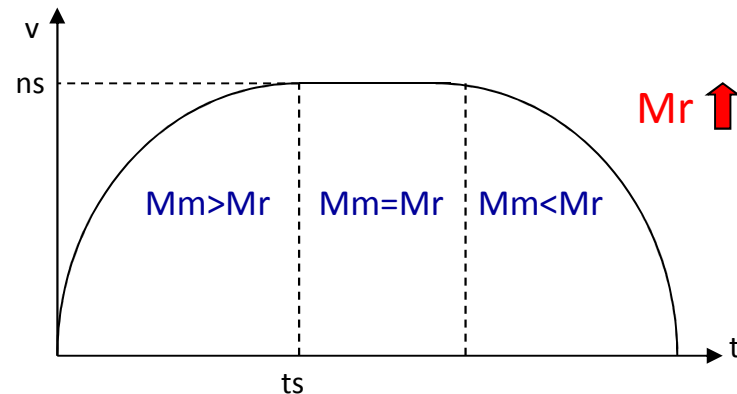
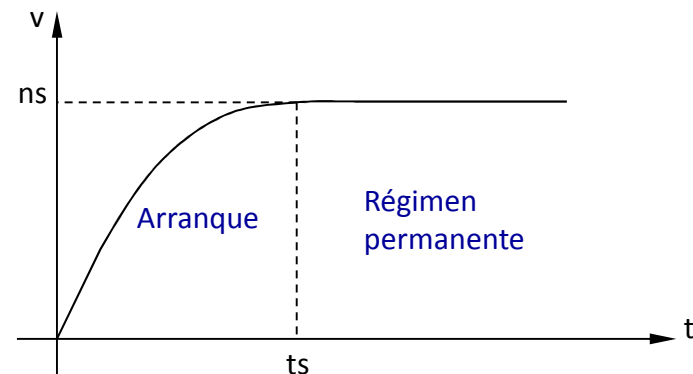
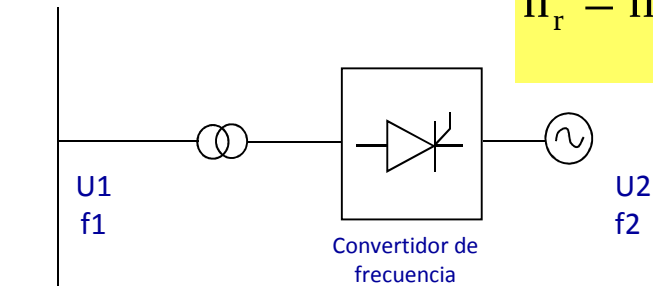
El motor síncrono. Inconvenientes

➡ Necesidad de variar la frecuencia de la señal de alimentación para variar la velocidad del motor.

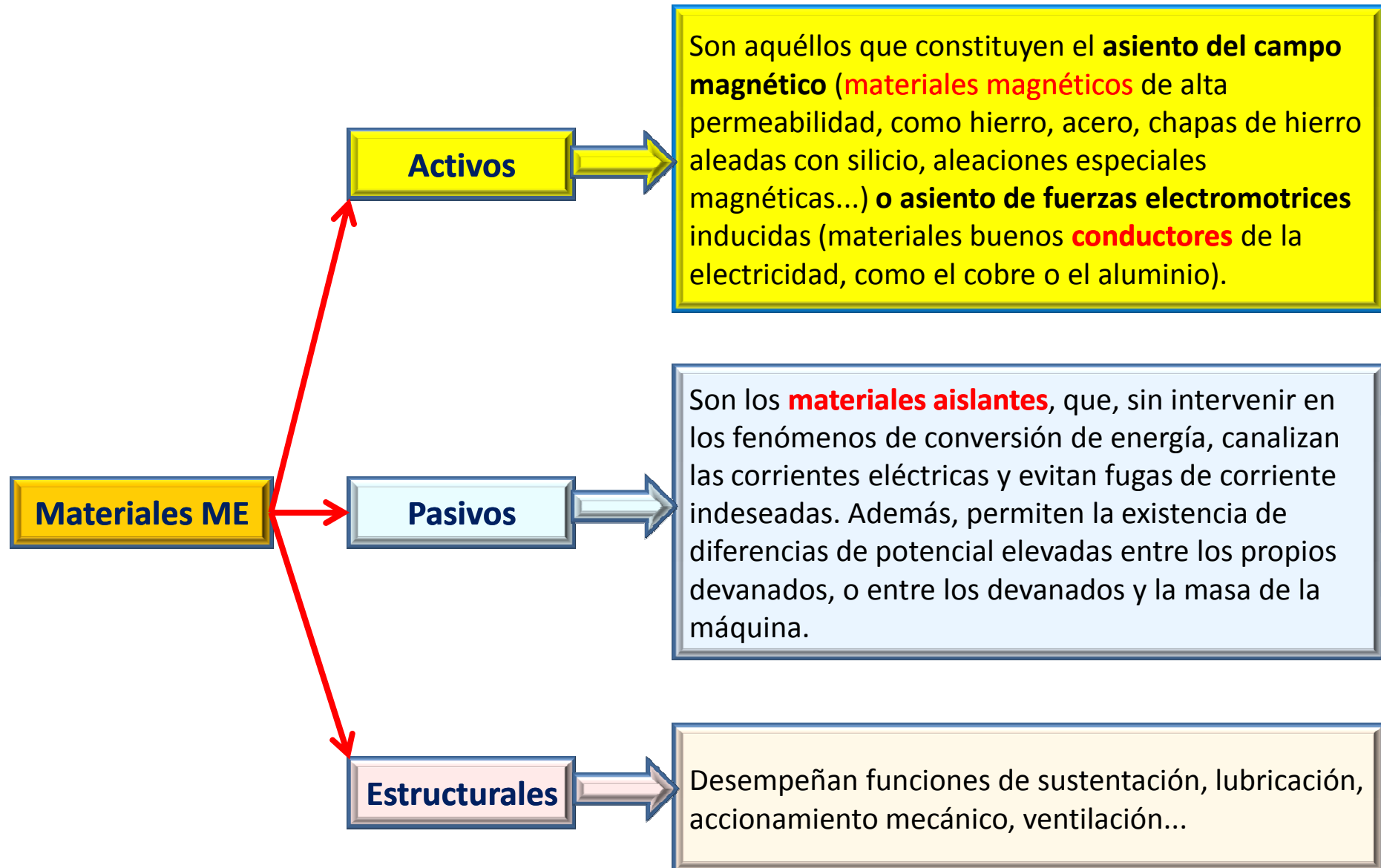
➡ Necesidad de llevar el motor a la velocidad de sincronismo en el arranque.

➡ Las variaciones que se presentan en la carga pueden ocasionar la pérdida de sincronismo.

$$n_r = n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$



MATERIALES UTILIZADOS EN ME



Circuito magnético. Materiales ferromagnéticos

Propiedades de los materiales ferromagnéticos.

- ◆ Aparece una gran inducción magnética al aplicarle una intensidad de campo magnético.
- ◆ Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando una elevada densidad de flujo magnético.
- ◆ Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.
- ◆ Permiten que las máquinas eléctricas tengan volúmenes razonables y costos menores.

Características de los materiales ferromagnéticos.

- ◆ Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Gran permeabilidad relativa μ / μ_r .
- ◆ Tienen una inducción magnética intrínseca máxima B_m muy elevada.
- ◆ Se imanar con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Relación no lineal entre los módulos de la inducción magnética (B) y el campo magnético (H).
- ◆ Un aumento de la intensidad del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de la intensidad del campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad (μ) como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- ◆ Conservan la imanación cuando se suprime el campo. Disponen de inducción remanente (B_R).
- ◆ Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados.

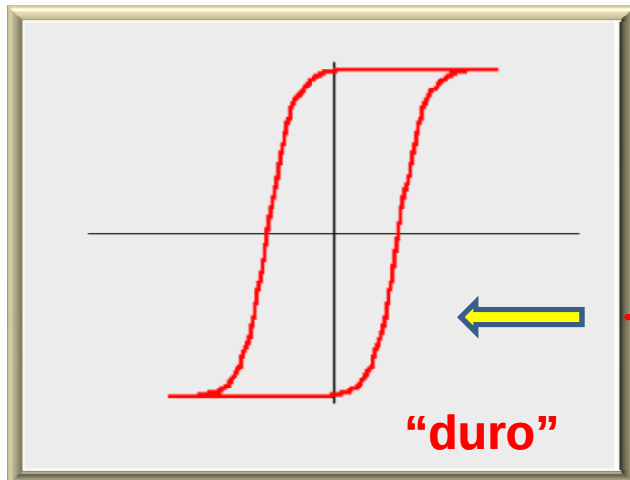
CICLO DE HISTÉRESIS

Cuando un material ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de éste, el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo residual (B_R).

Para desimantarlo será precisa la aplicación de un campo contrario al inicial ($-H_c$).

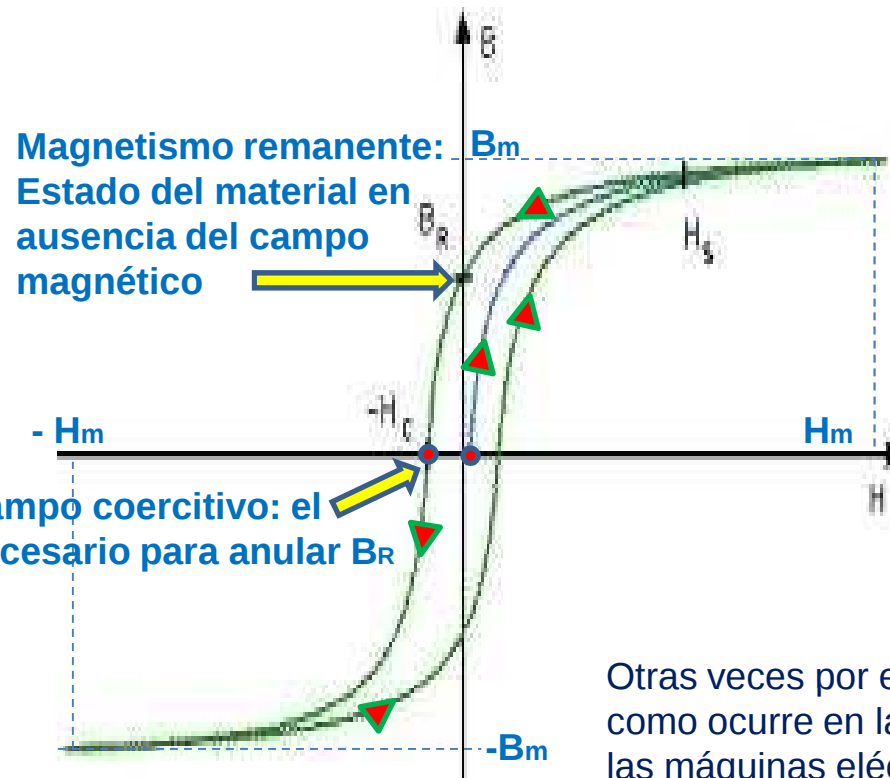
Este fenómeno se llama HISTERESIS magnética, que quiere decir, inercia o retardo.

Los materiales tienen una cierta inercia a cambiar su campo magnético.



Cada material tiene su propio ciclo de histéresis característico.

Hay veces en que interesa acentuar la histéresis como ocurre en los núcleos de las memorias magnéticas por lo que se fabrican de Ferritas.



Otras veces por el contrario, como ocurre en la mayoría de las máquinas eléctricas interesa un núcleo cuyo ciclo de histéresis sea lo más estrecho posible



MATERIALES CONDUCTORES

Conductividad a 20°C de varios materiales conductores

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD σ A 20°C (S m/mm ²)
Cobre patrón	58
Cobre electrolítico recocido	57
Cobre electrolítico comercial	56
Cobre electrolítico duro	56
Aluminio recocido	36
Aluminio duro	35,4
Aluminio inyectado para rotores	33

■ En las máquinas eléctricas se utilizan básicamente dos materiales conductores, que son el cobre y el aluminio. Para que la conductividad de estos materiales se mantenga alta deben ser de gran pureza. Los procesos de laminación y estirado disminuyen su conductividad, por lo que deben ser sometidos seguidamente a un proceso de recocido. En la tabla se indican los valores característicos de conductividad a 20°C para varios materiales.

MATERIALES AISLANTES

*Aislante eléctrico o dieléctrico es aquel material que tiene una conductividad eléctrica tan baja que se puede despreciar la corriente que pasa por él. Esta pequeñísima corriente que pasa a través de un aislante se denomina **corriente de fuga**.*

El vacío es el único aislante perfecto ya que tiene conductancia nula.

Los aislantes se utilizan en las máquinas eléctricas para asegurar el aislamiento eléctrico entre los conductores y entre éstos y las piezas metálicas y la carcasa. Estos materiales suelen ser la parte más delicada de una máquina eléctrica debido a su sensibilidad a las sollicitaciones térmicas, mecánicas y dieléctricas.

La **resistencia de aislamiento** de un dieléctrico es la resistencia que opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección en que se tiene que asegurar el aislamiento

MATERIALES AISLANTES

Clase térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico según las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1.

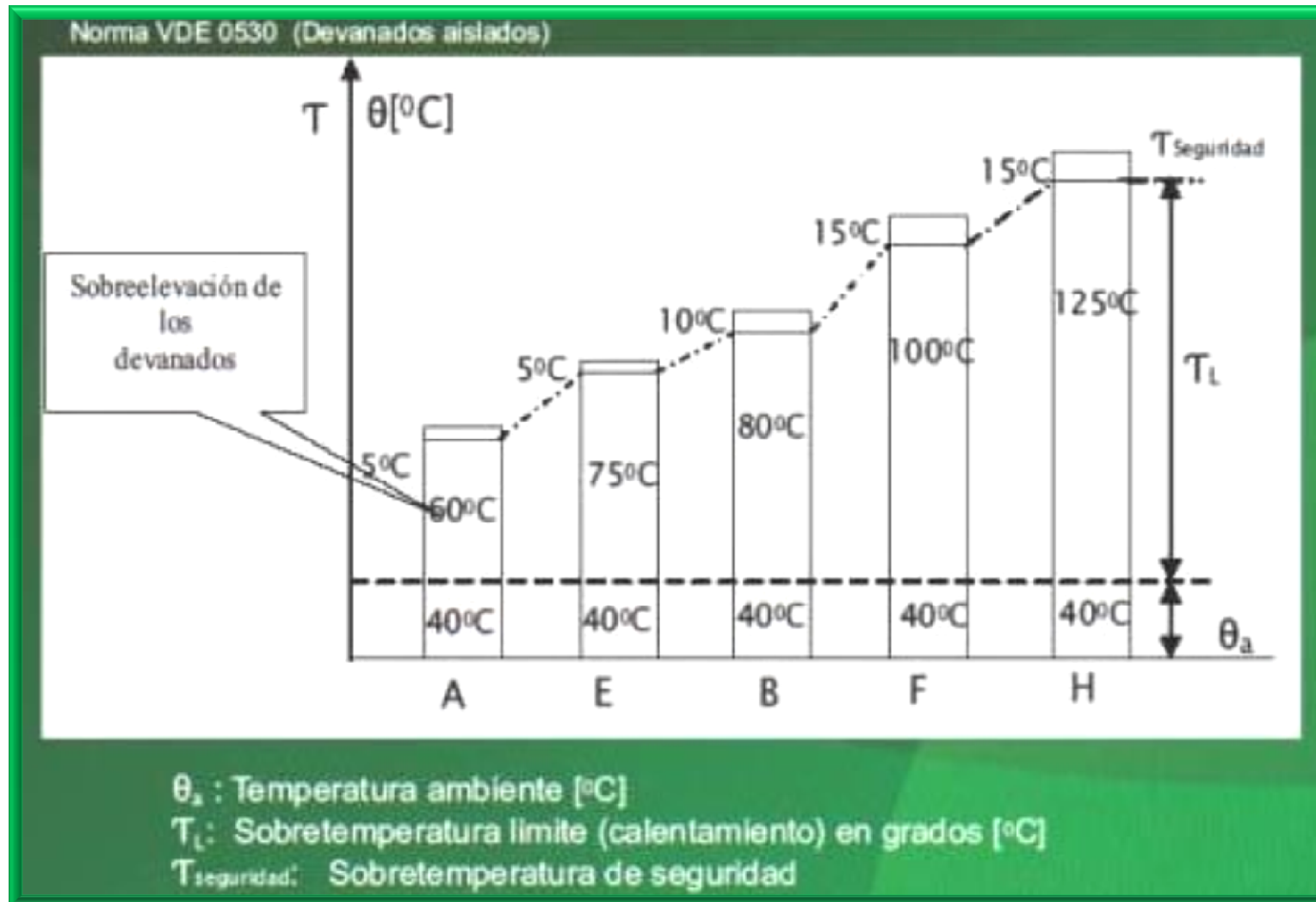
CLASE TÉRMICA (°C)	ANTIGUA DESIGNACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	CALENTAMIENTO MÁXIMO (*) (°C)
90	Y	90	50
105	A	105	65
120	E	120	80
130	B	130	90
155	F	155	115
180	H	180	140
200	N	200	160
220	R	220	180
250	-	250	210

(*) Esta columna indica el calentamiento máximo en el supuesto que el fluido refrigerante sea aire ambiente a una altitud inferior a 1000 metros sobre el nivel del mar

Ejemplos:

- . 90°C: Algodón, seda, papel sin impregnación.
- 105 °C: Algodón, seda, papel impregnados o sumergidos en aceite.
- 120°C: Fibras orgánicas sintéticas. Por ejemplo: esmaltes de acetato de polivinilo, barnices de resinas alquídicas,...
- 130°C: Materiales a base de poliéster y poliimidos aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, los esmaltes de resinas de poliuretano.
- 155°C: Materiales a base de fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, la fibra de vidrio tratada con resinas de poliéster.
- 180°C: Materiales a base de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica. Por ejemplo, el papel de mica aglomerado con siliconas.
- 200°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... capaces de soportar hasta 200°C.
- 220°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... poliimidas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 220°C.
- 250°C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, ... poliimidas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 250°C

CLASES DE AISLAMIENTO Y TEMPERATURAS ADMISIBLES



DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO

La degradación de un aislante, se aprecia por:

- ➡ **Disminución de la resistencia a la penetración de la humedad**, debido a la modificación química de la superficie y a la aparición de grietas.
- ➡ **Disminución progresiva de las características mecánicas**. Por ejemplo pérdida de flexibilidad, aumento de fragilidad, etc.
- ➡ **Aumento de las pérdidas dieléctricas**
- ➡ **Reducción de espesor del aislante**

La expresión “**Condiciones usuales de funcionamiento**” alude a que en la realidad industrial, se cumple que:

- ➡ **Normalmente las máquinas no trabajan de forma ininterrumpida** (no trabajan las 24 horas del día durante los 365 días del año)
- ➡ **Cuando están cargadas, no lo están permanentemente al 100%** de su capacidad nominal
- ➡ **La temperatura del medio ambiente y/o del fluido refrigerante no está a todas horas y en todas las épocas del año en el valor límite fijado por las normas**

REQUISITOS QUE DEBE SATISFACER UN AILANTE

Tener:

R. eléctricos

- ➡ Elevada rigidez dieléctrica
- ➡ Alta resistividad
- ➡ Bajas pérdidas dieléctricas

Capacidad para soportar:

R. mecánicos

- ➡ Fuerzas centrífugas
- ➡ Tensiones mecánicas de dilatación/contracción
- ➡ Vibraciones
- ➡ Solicitaciones durante los cortocircuitos

Tener:

R. térmicos

- ➡ Alta conductividad térmica
- ➡ Termoestabilidad a altas temperaturas
- ➡ Elevado calor específico

Tener:

R. fisicoquímicos

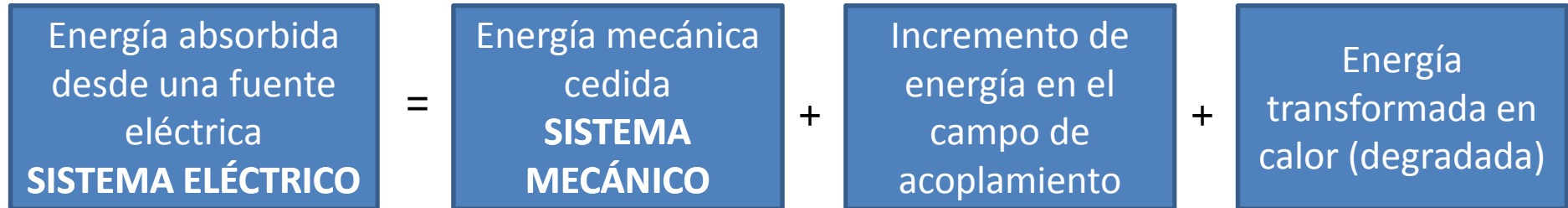
- ➡ Antihigroscopicidad
- ➡ Capacidad para conservar la elasticidad
- ➡ Oleoresistencia
- ➡ Resistencia frente a disolventes

REQUISITOS QUE DEBE SATISFACER UN AILANTE

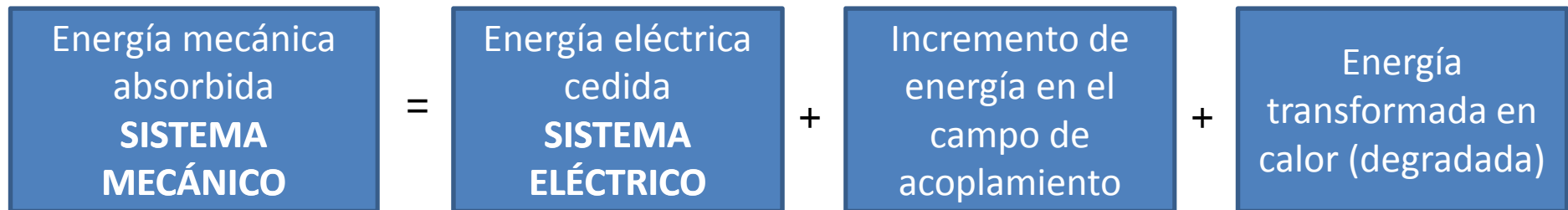


BALANCE DE ENERGÍA

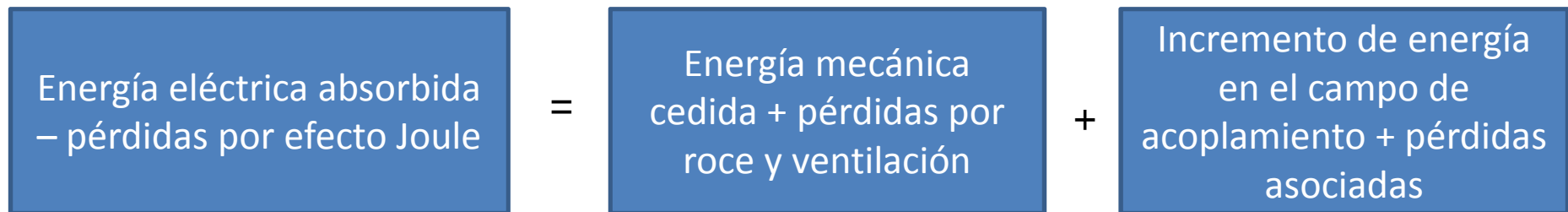
→ Motor



→ Generador



→ Motor



Energía mecánica interna

BALANCE DE ENERGÍA

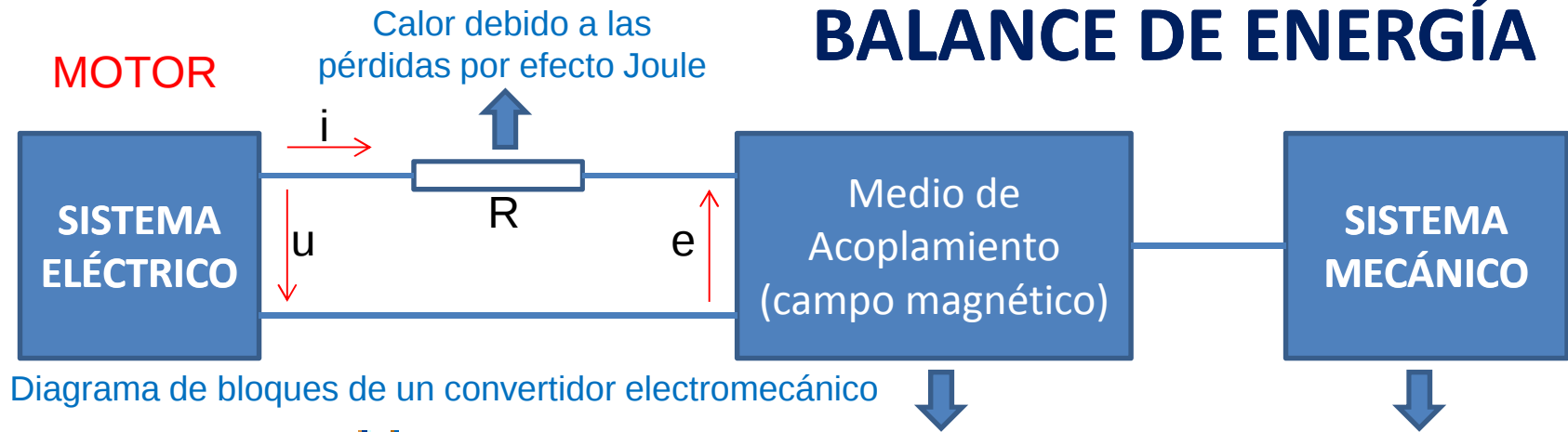


Diagrama de bloques de un convertidor electromecánico

$$dW_1 = u \cdot i \cdot dt \quad (J)$$

$$d_{p_{cu}} = R \cdot i^2 \cdot dt \quad (J)$$

$$u \cdot i \cdot dt - R \cdot i^2 \cdot dt = (u - R \cdot i) \cdot i \cdot dt = dW_s$$

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad e = u - R \cdot i$$

Entonces: $dW_s = e \cdot i \cdot dt$

$$dW_s = e \cdot i \cdot dt = dW_c + dW_m$$

Calor debido a las pérdidas en los medios ferromagnéticos (Histéresis y corrientes de Foucault)

Calor debido a las pérdidas mecánicas

dW_1 = diferencial de energía que se toma del sistema eléctrico en dt

u, i = valores instantáneos de tensión y corriente

$d_{p_{cu}}$ = diferencial de la pérdida de energía en R

e = (f.e.m.) tensión inducida en las bobinas del inducido por variación del flujo Ψ

dW_e = diferencial de la energía eléctrica interna

dW_m = diferencial de la energía mecánica interna

dW_c = diferencial de la energía eléctrica absorbida por el campo de acoplamiento, incluidas las pérdidas.

En régimen permanente: $dW_c = 0 \Rightarrow dW_s = e \cdot i \cdot dt = dW_m$

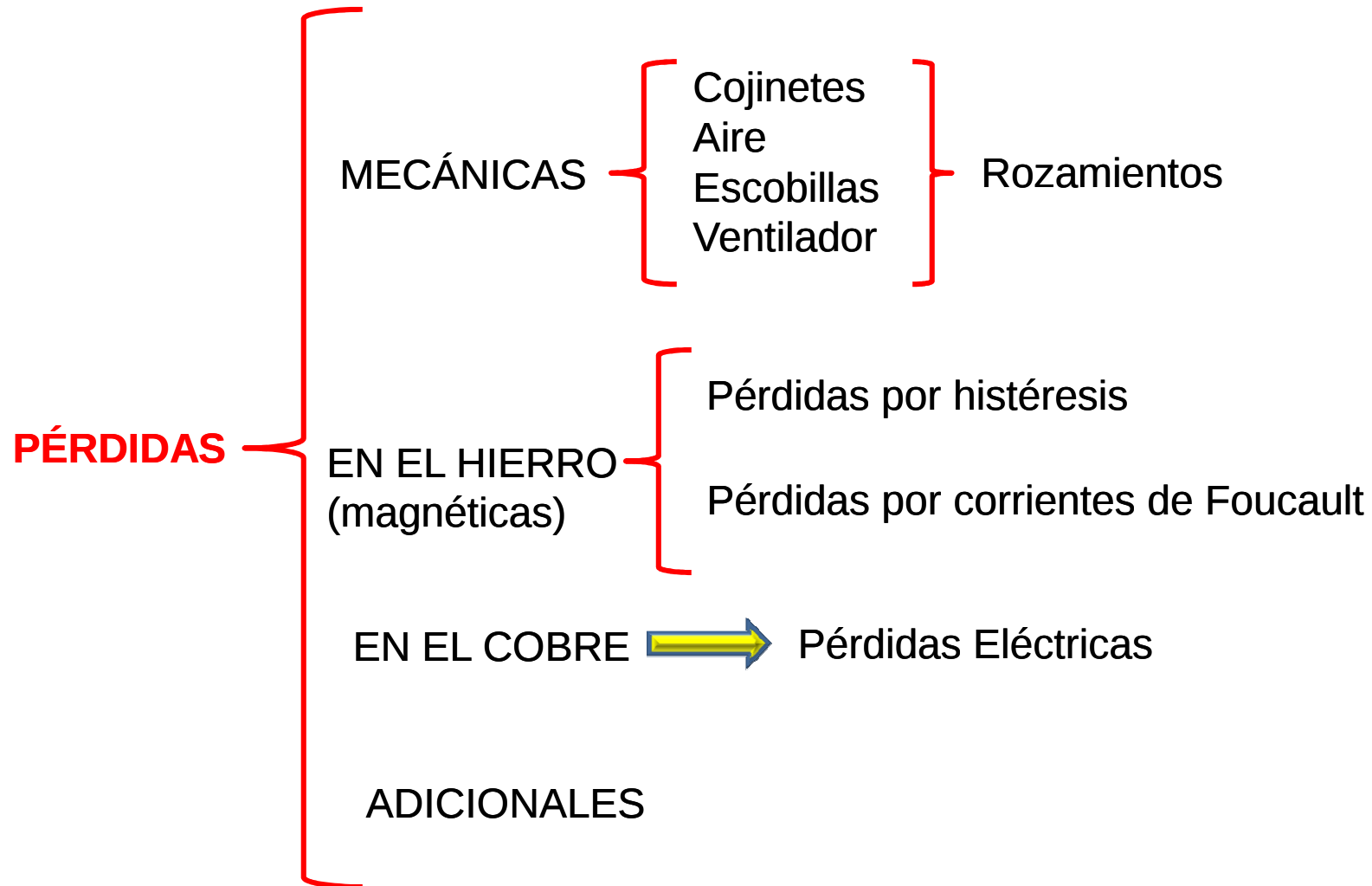
O lo que es igual:

$$P_s = e \cdot i = P_m = M_i \cdot \Omega$$

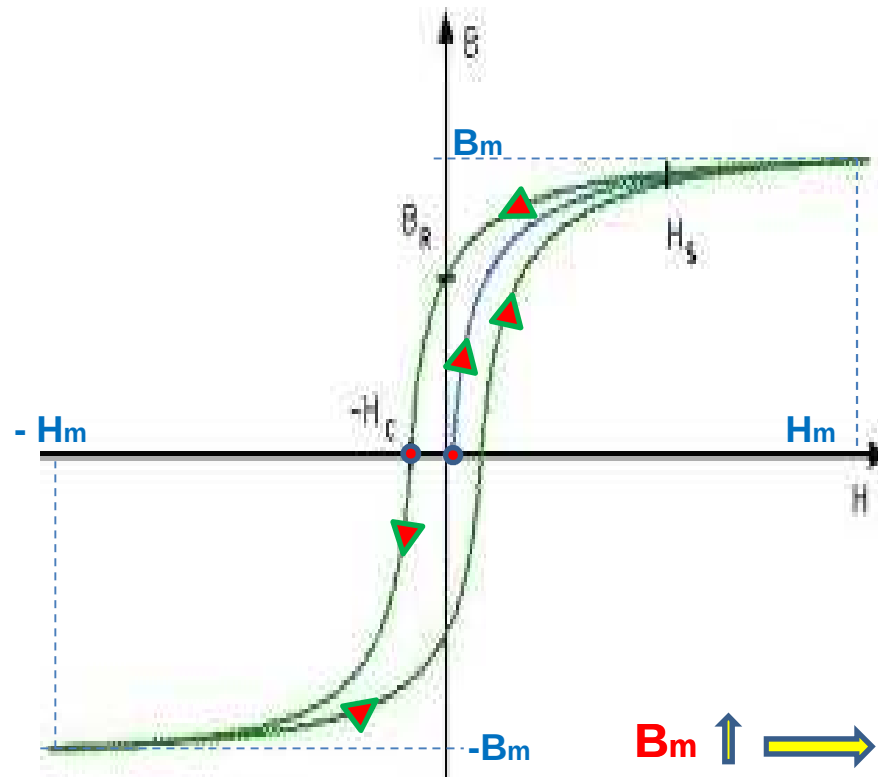
M_i = par interno
 Ω = velocidad angular

Potencia eléctrica interna = Potencia mecánica interna

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



Pérdidas por histéresis

Las pérdidas por histéresis son proporcionales al peso del material magnético y al área del ciclo de histéresis

f → [Cuanto mayor sea f mayor será el número de ciclos de histéresis por unidad de tiempo

$B_m \uparrow \Rightarrow P_h \uparrow \uparrow$

Ciclo de histéresis

$$P_h = K_h \cdot f \cdot (B_m)^2 \quad \text{W/kg}$$

P_h = Pérdidas por histéresis por unidad de peso (W/kg)

K_h – constante dependiente del material empleado

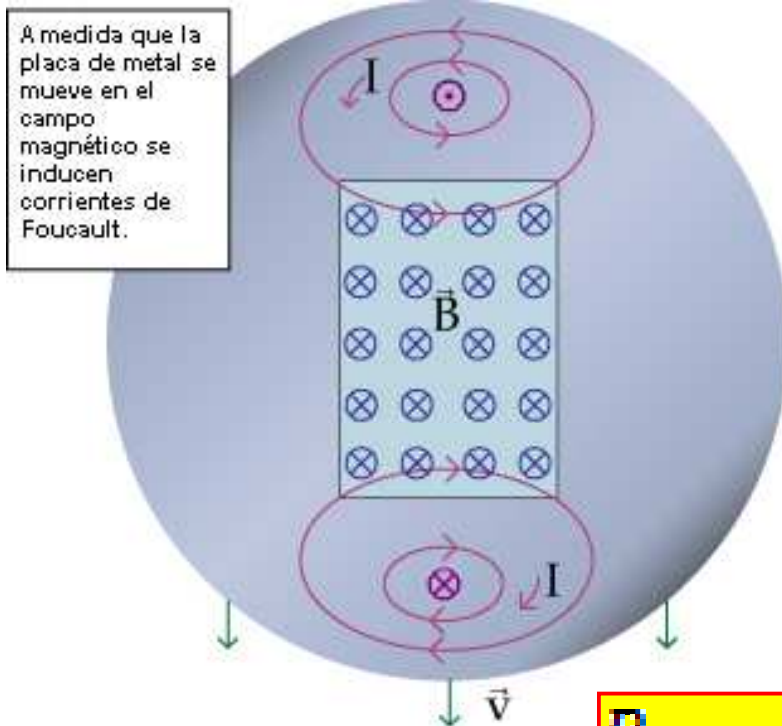
f = Frecuencia (Hz)

B_m = Inducción máxima (T) (*)

(*) Estas pérdidas no dependen de la ley temporal que siga la inducción (de la forma de onda del flujo), sino exclusivamente de sus valores máximos.

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas por corrientes de Foucault



Chapas magnéticas

$$P_F = k_F (f \cdot B_m \cdot \tau)^2 \text{ W/kg}$$

$$k_F = \frac{4k^2}{30\rho\gamma}$$

P_F = Pérdidas por corrientes de Foucault por unidad de peso (W/kg)

k_F = Constante dependiente del material empleado

f = Frecuencia (Hz)

B_m = Inducción máxima (T)

τ = Espesor de la chapa (cm)

k = Factor de forma de la onda de inducción

ρ = Resistividad del material ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

γ = Peso específico (g/cm³)

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas combinadas en el hierro

Pérdidas por corrientes de Foucault $\Rightarrow P_F = k_F (f \cdot B_m \cdot \tau)^2$ W/kg

Pérdidas por histéresis $\Rightarrow P_h = K_h \cdot f \cdot (B_m)^2$ W/kg

Las pérdidas combinadas en el hierro serán la suma de unas y otras:

$$P_{Fe} = P_h + P_F$$

$$P_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{G} = k_h \cdot f \cdot (B_m)^2 + k_F (f \cdot B_m \cdot \tau)^2 \quad \text{W/kg} \quad G = \text{Peso en kg}$$

Los coeficientes k_h y k_F dependen de la naturaleza de la chapa (aunque este último viene afectado también por el factor de forma de la onda de inducción y por la pulcritud del mecanizado).

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas eléctricas

► En todo conductor recorrido por una corriente eléctrica se producen pérdidas por **efecto Joule**

$$P_J = Ri^2 = R \cdot i \cdot i = u \cdot i = u \cdot \frac{u}{R} = \frac{u^2}{R} \quad (\text{W})$$

R= Resistencia del conductor en Ω

I = Corriente que circula por el conductor en A

u= Caída de tensión óhmica en el conductor en V

ρ = Resistividad a la temperatura que se considere en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

$X=1/\rho$ = Conductividad a la misma temperatura en Sm/mm^2

L= Longitud del conductor en m

S= Sección del conductor en mm^2

γ = Peso específico en g/cm^3

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} = \frac{l}{X \cdot s} \quad \Delta = \frac{i}{s} \quad (\text{A}/\text{mm}^2) \quad G = \frac{l \cdot s}{1000} \gamma \quad \text{Kg}$$

$$P_J = k_J \cdot G \cdot \Delta^2 \quad \text{W}$$

$$k_J = \frac{1000 \cdot \rho}{\gamma} \quad (\text{W}/\text{kg})/\text{A}^2$$

En función de la temperatura:

$$\frac{R'}{R} = \frac{T'}{T} = \frac{235 + \theta'}{235 + \theta}$$

A igualdad de corriente:

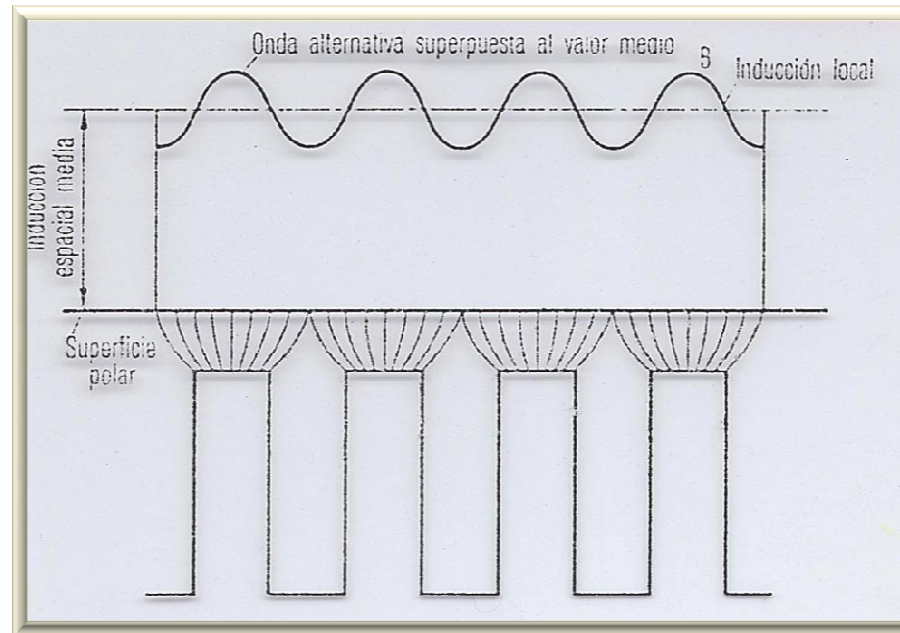
$$\frac{P'_J}{P_J} = \frac{T'}{T} = \frac{235 + \theta'}{235 + \theta}$$

T y T' son las temperaturas eléctricas absolutas, para el cobre $T=235+\theta$, siendo θ la temperatura centígrada

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas adicionales en el hierro

a) Pérdidas superficiales



Pulsación del flujo en las expansiones polares ante las ranuras y dientes

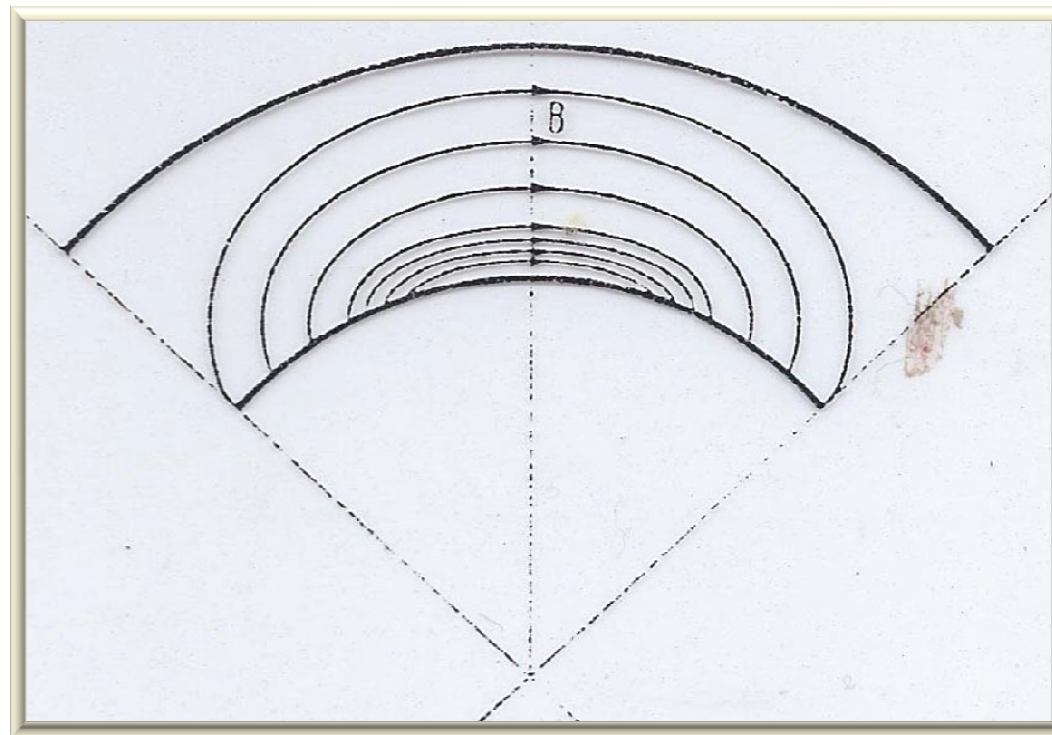
$$f_n = N \frac{n}{60}$$

Donde: $\left\{ \begin{array}{l} N = \text{Número de ranuras} \\ n = \text{velocidad (r.p.m)} \end{array} \right.$

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas adicionales en el hierro

- b) Pérdidas por concentración de flujo
- c) Pérdidas por diferencia de longitud en las líneas de inducción

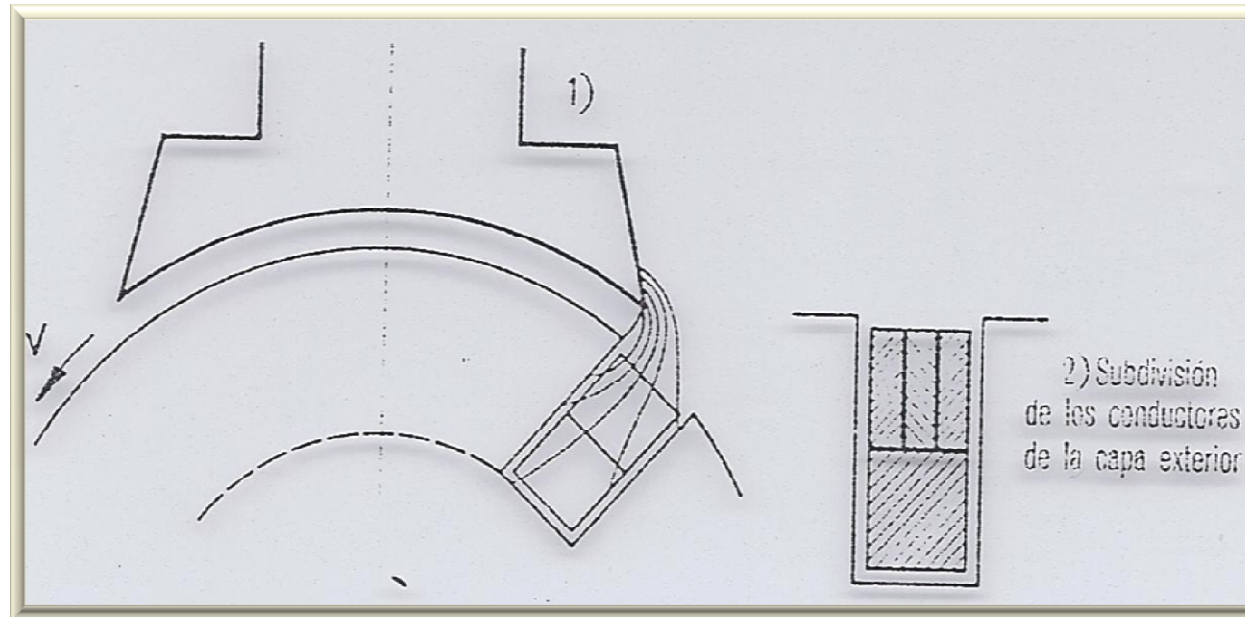


Desigual reparto de la inducción en una corona circular

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas adicionales en el hierro

- d) Pérdidas por pulsación de flujo en la masa de los dientes
- e) Pérdidas adicionales en los conductores del inducido por efecto del flujo inductor

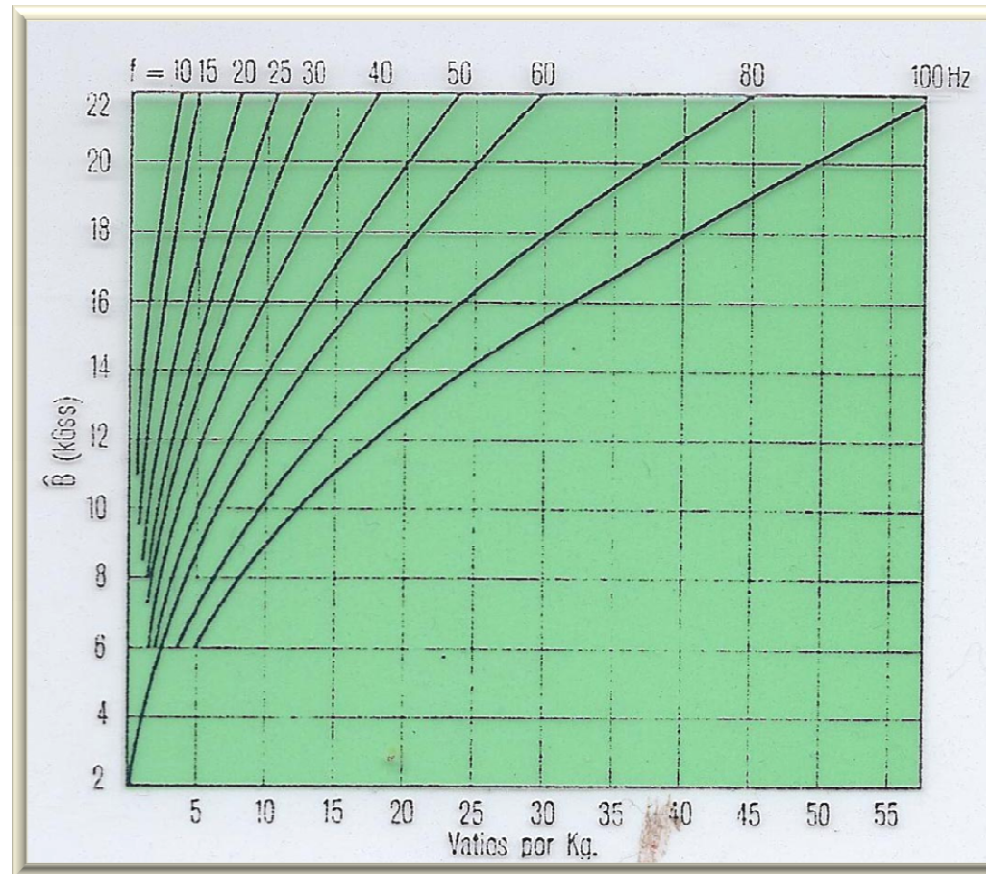


Pérdidas adicionales en los conductores debidas al flujo inductor

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas adicionales en el hierro

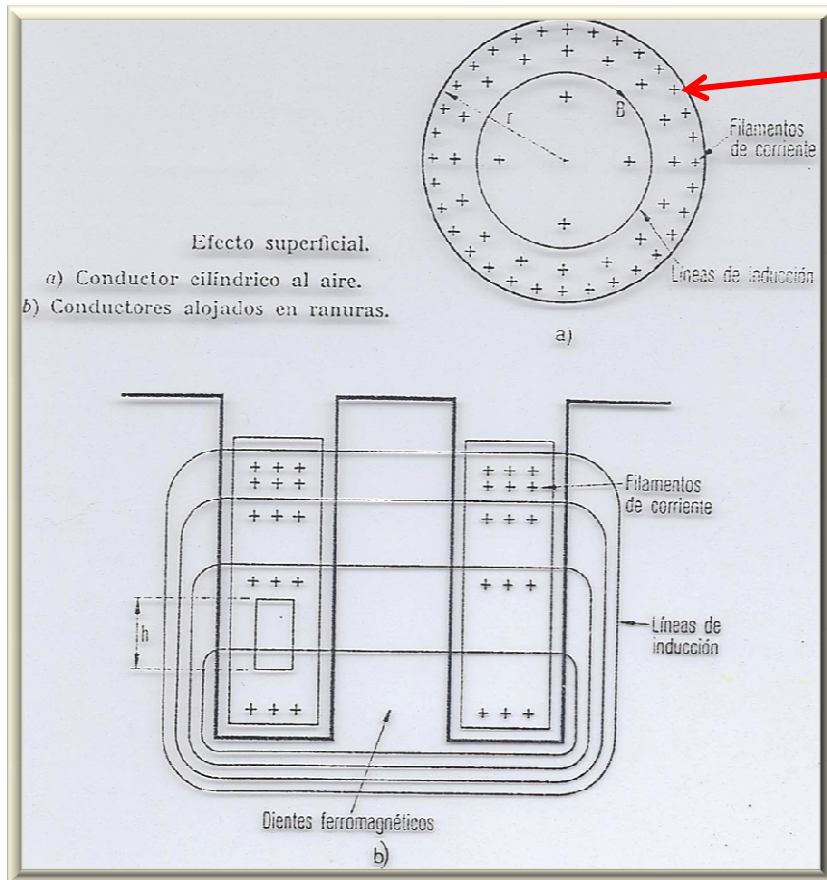
f) Computo de las pérdidas adicionales en el hierro



Pérdidas globales en el hierro

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas adicionales en los conductores



Pérdidas adicionales en los conductores

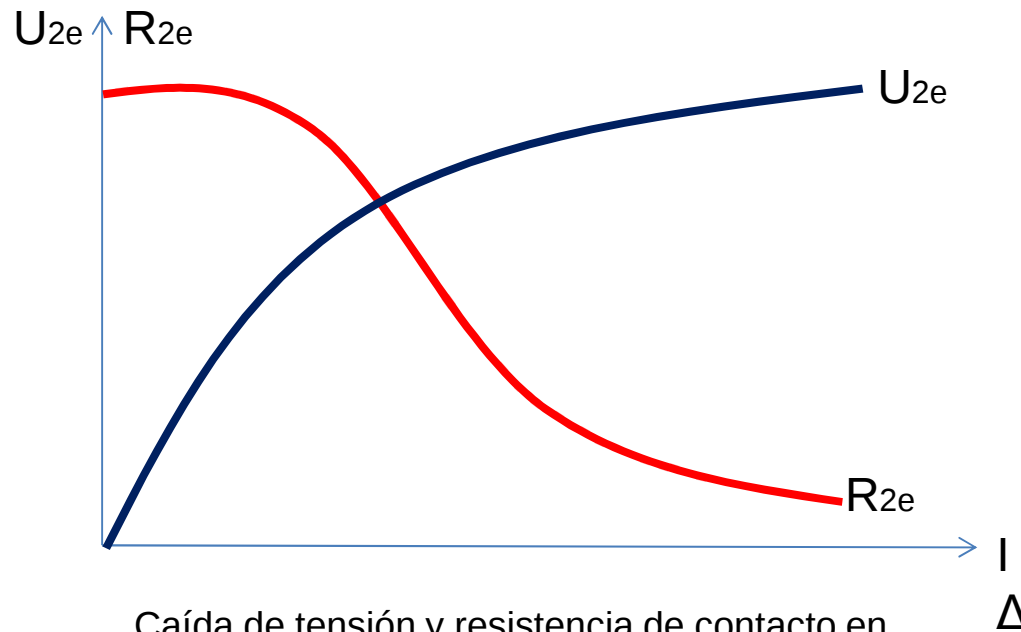
Efecto Pelicular.

Cuando por un conductor circula una corriente continua, esta corriente se reparte de forma uniforme por toda la sección S de dicho conductor.

Sin embargo, cuando la corriente es alterna, esta genera campos magnéticos alternos que, a su vez, inducen f.e.m.s sobre el propio conductor. Esto hace que la corriente ya no se reparta de forma uniforme por toda la sección S , sino que se tiende a concentrar en la parte externa. Este es el *efecto pelicular*, también llamado *efecto piel*, *efecto Kelvin* o *efecto skin*.

PÉRDIDAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdidas por caída de tensión en el contacto móvil colector-escobillas



Caída de tensión y resistencia de contacto en las escobillas en función de la corriente o de la densidad de corriente

$$P_e = U_{2e} I$$

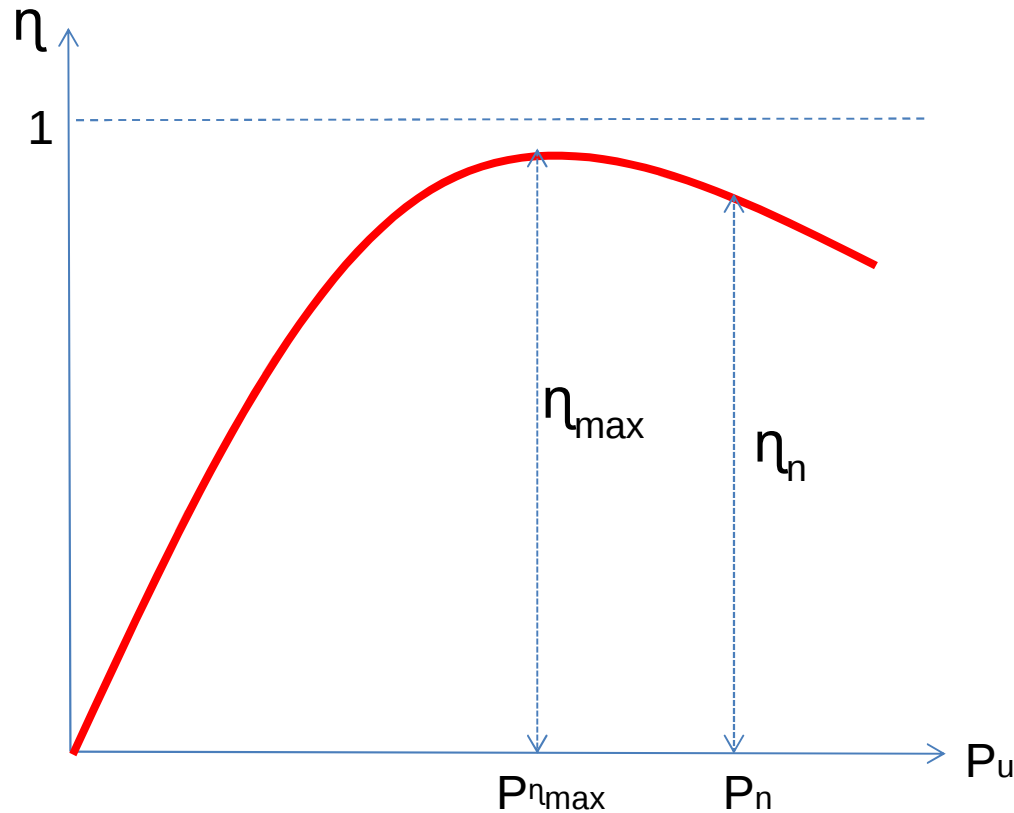
$$U_{2e} = 0,5 \div 3,5 \text{ V}$$

A falta de otros datos más precisos, se consideran, salvo que expresamente se indique que se desprecien en los cálculos las caídas en las escobilla, los siguientes valores:

→ $U_{2e} = 2 \text{ V}$ para colectores segmentados

→ $U_{2e} = 1 \text{ V}$ para anillos continuos

RENDIMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



Curva del rendimiento en función de la potencia útil

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_a} 100$$

Motor:

$$\eta = \frac{P_a - p}{P_a}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_a - p}{P_a} 100$$

Generador:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_u + p} 100$$

Donde:

P_u = Potencia útil

P_a = Potencia absorbida

p = pérdidas

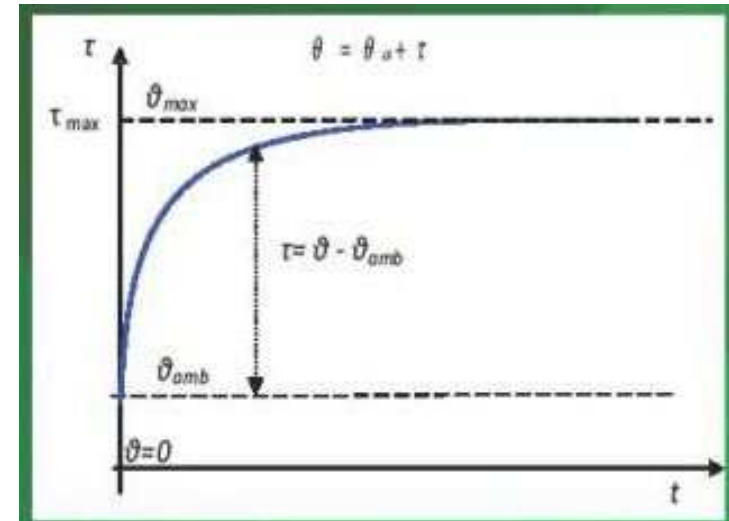
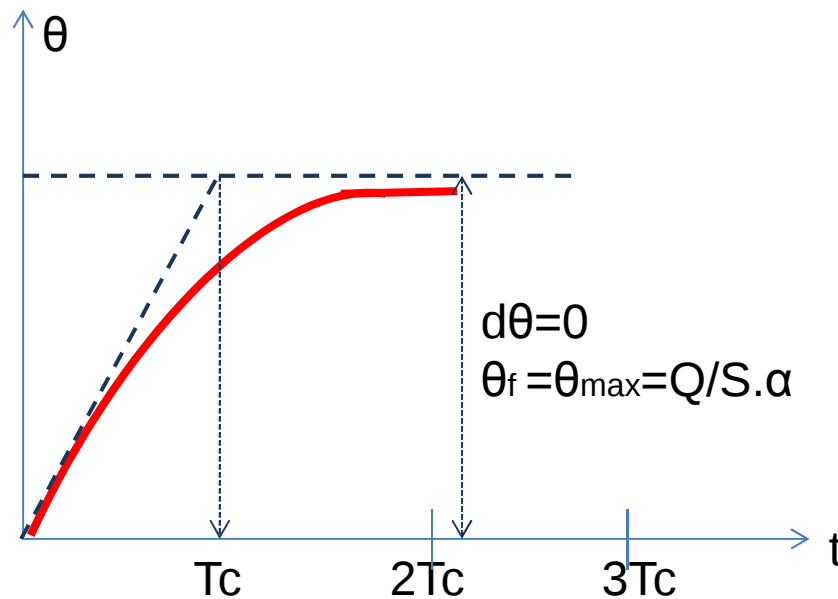
a = pérdidas fijas

bI^2 = pérdidas variables

$$P_u = kI \quad p = a + bI^2 \quad \eta = \frac{kI}{kI + a + bI^2}$$

Máximo $\Rightarrow \frac{d\eta}{dI} = 0 \Rightarrow a = bI^2 \Rightarrow$ Pérdidas fijas = Pérdidas variables

CALENTAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



Curvas de calentamiento ideales de un cuerpo homogéneo

T_c = Constante térmica de calentamiento

Ecuación diferencial que define el proceso de calentamiento – enfriamiento de un cuerpo homogéneo:

$$Q dt = m \cdot c \cdot d\theta + S \cdot \alpha \cdot \theta \cdot dt$$

m =masa (gr); c = calor específico (cal/gr °C);
 S = Superficie total (m²); α = coeficiente total de
 transferencia térmica al exterior (W/m²°C)

La solución general de la ecuación diferencial es:

$$\theta = \theta_f (1 - e^{-t/T}) + \theta_0 e^{-t/T}$$

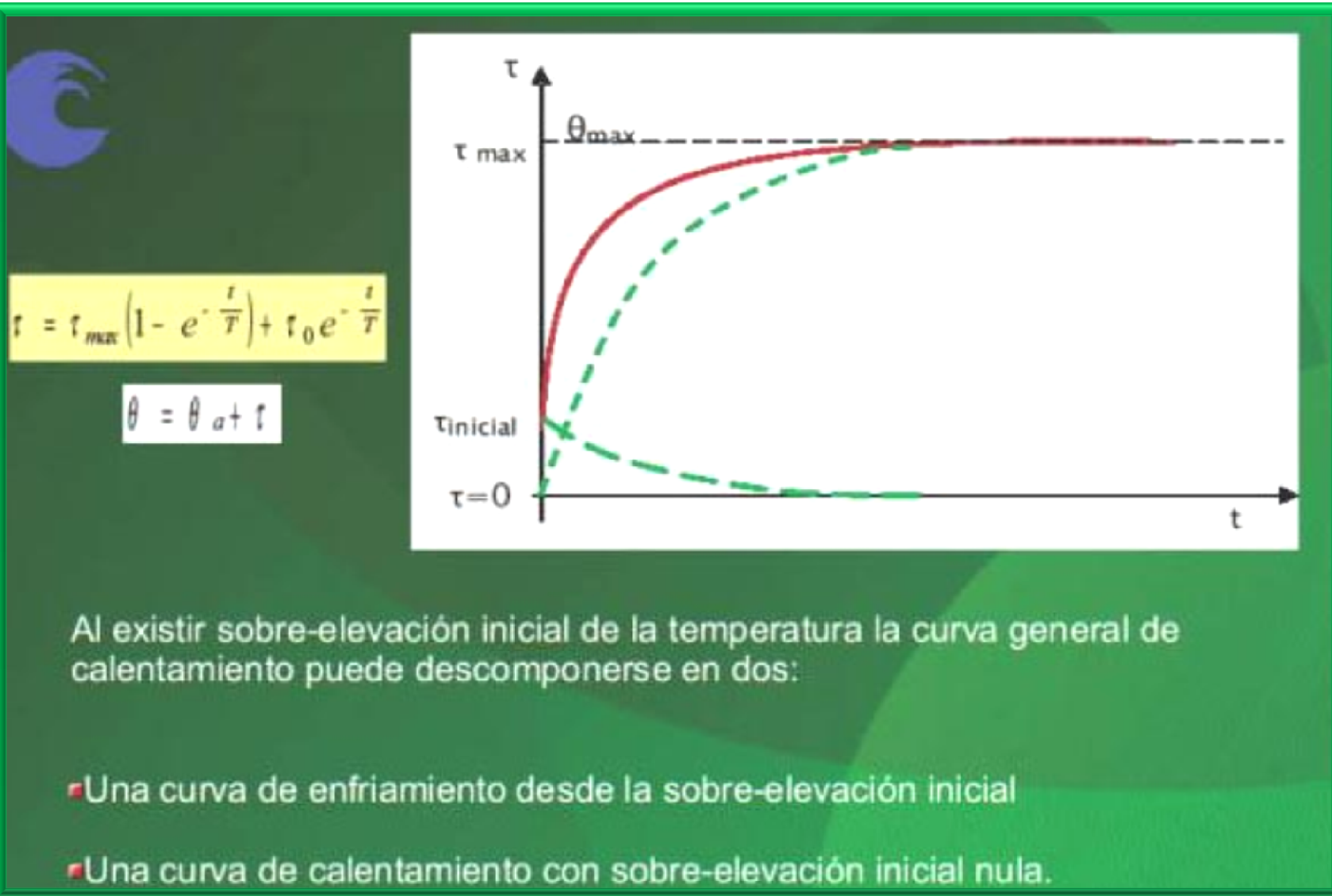
θ_0 = Sobretemperatura que, en el instante inicial, posee la máquina respecto al medio ambiente θ_{amb}

$\theta_f = \theta_{max}$ = Sobretemperatura alcanzada al final del proceso

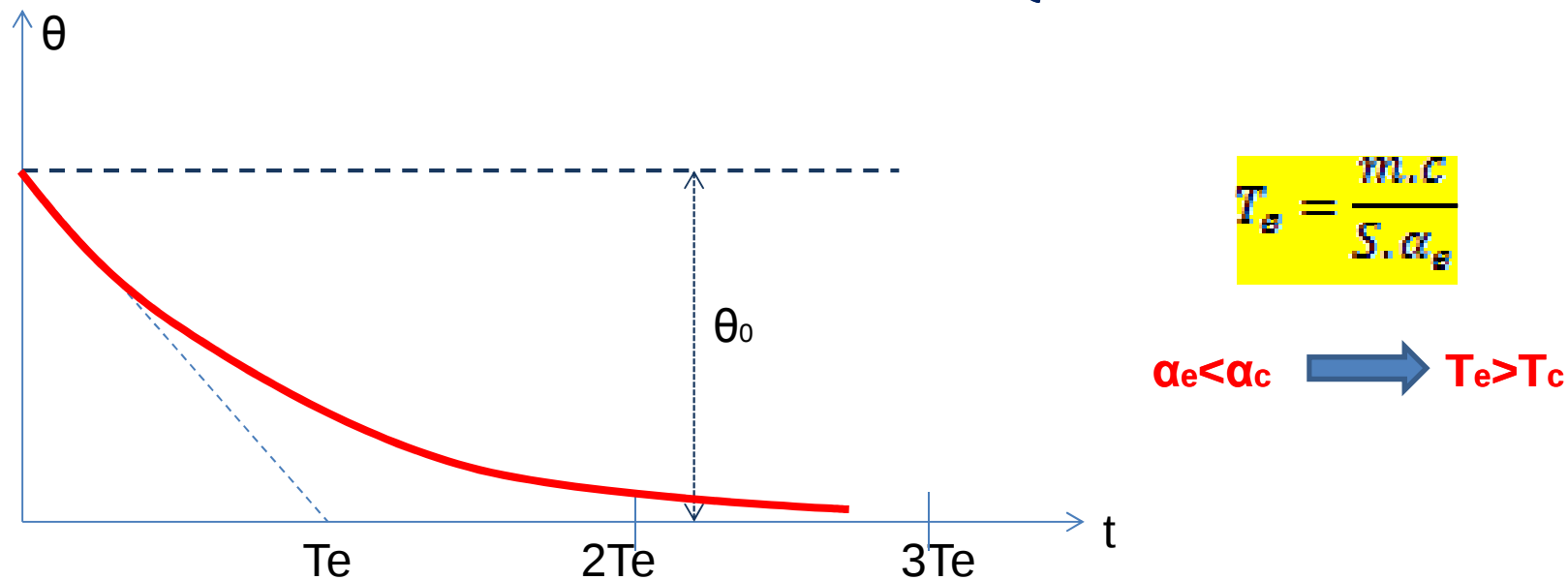
T_c = Constante térmica de calentamiento. Cuyo valor numérico viene dado por:

$$T_c = \frac{m \cdot c}{S \cdot \alpha_c}$$

CALENTAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



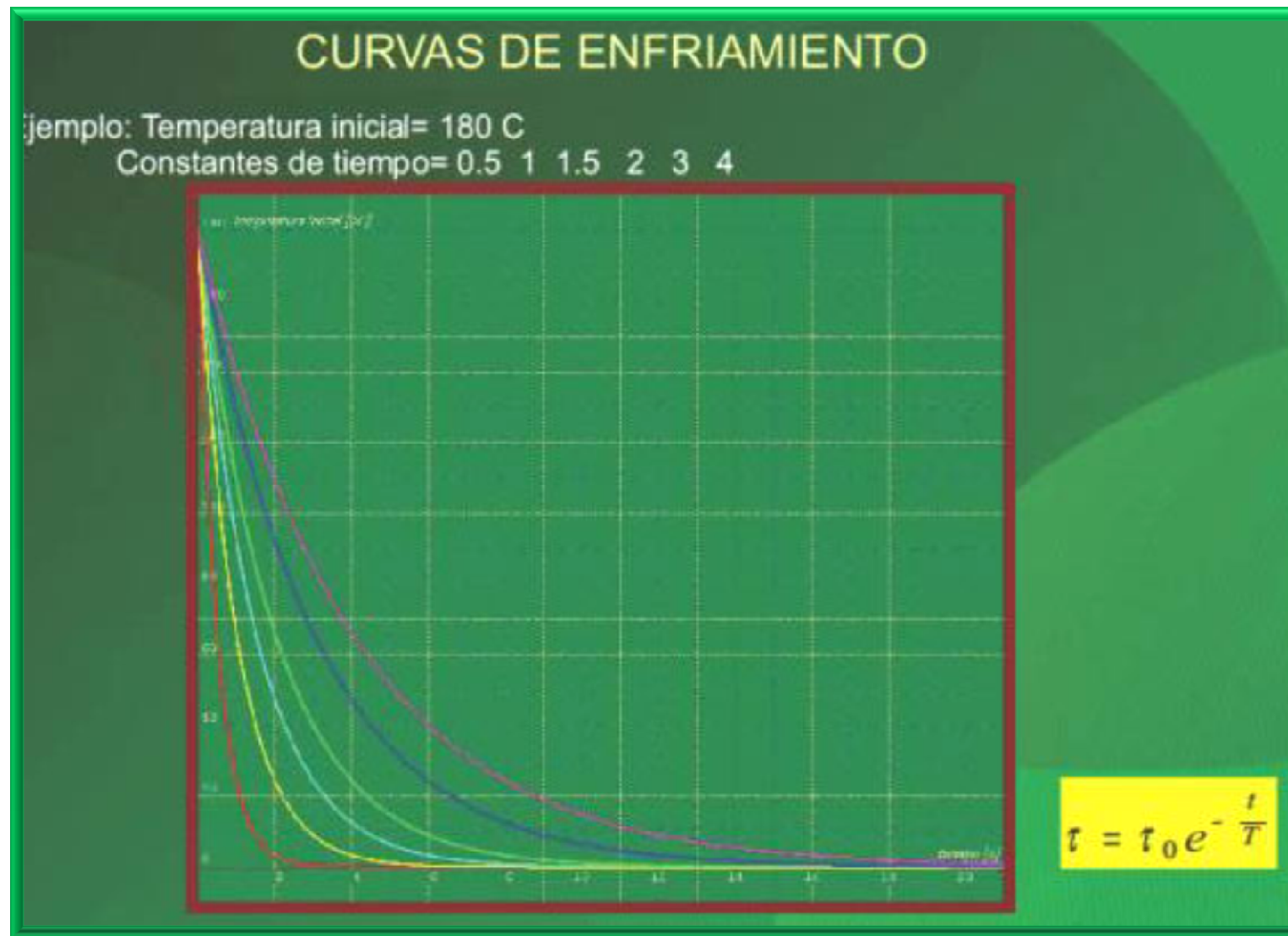
ENFRIAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



El estudio térmico precedente es una aproximación, ya que:

- Una máquina eléctrica no es un cuerpo homogéneo
- La conductividad térmica de los componentes individuales de la máquina no es infinita.
- La temperatura del medio exterior tampoco es constante
- Determinados parámetros que se suponen constantes (por ejemplo, α) no lo son, sino que varían con la temperatura.

ENFRIAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

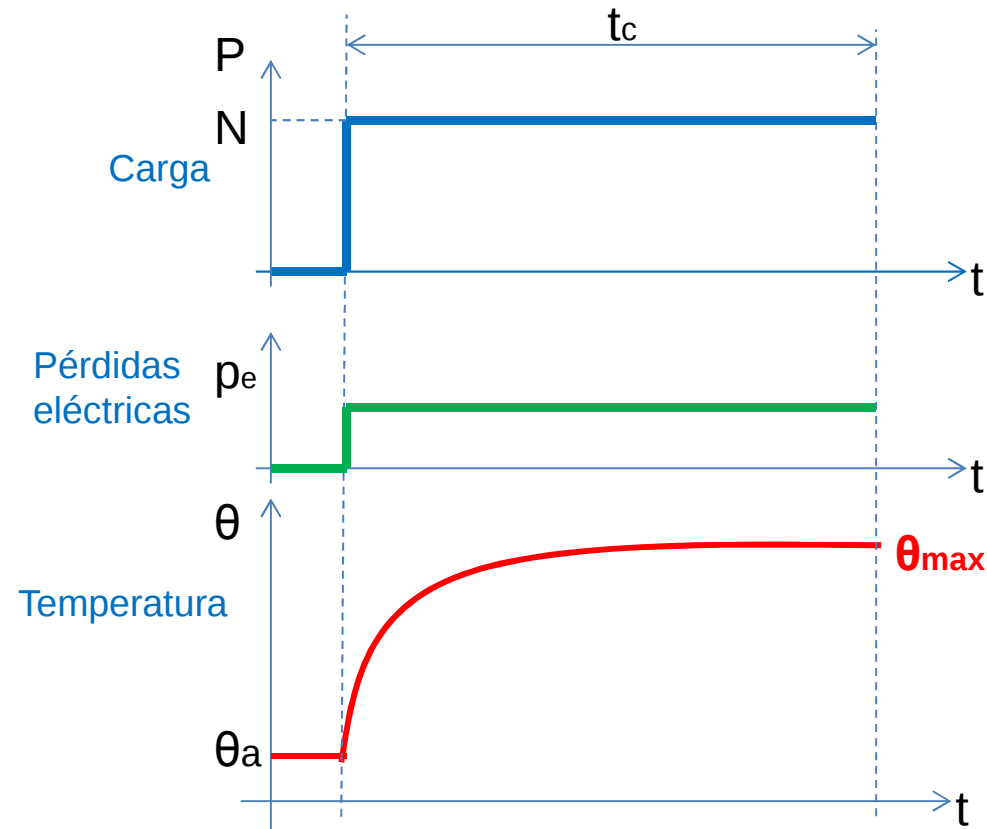


CLASES DE SERVICIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(Según UNE 20-113-73)

S1: Servicio continuo

Funcionamiento en un estado de carga constante, como el mostrado en la **Figura** con una duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico. El periodo de carga t_c es mucho mayor que la constante térmica de tiempo τ .



N = Funcionamiento en régimen nominal

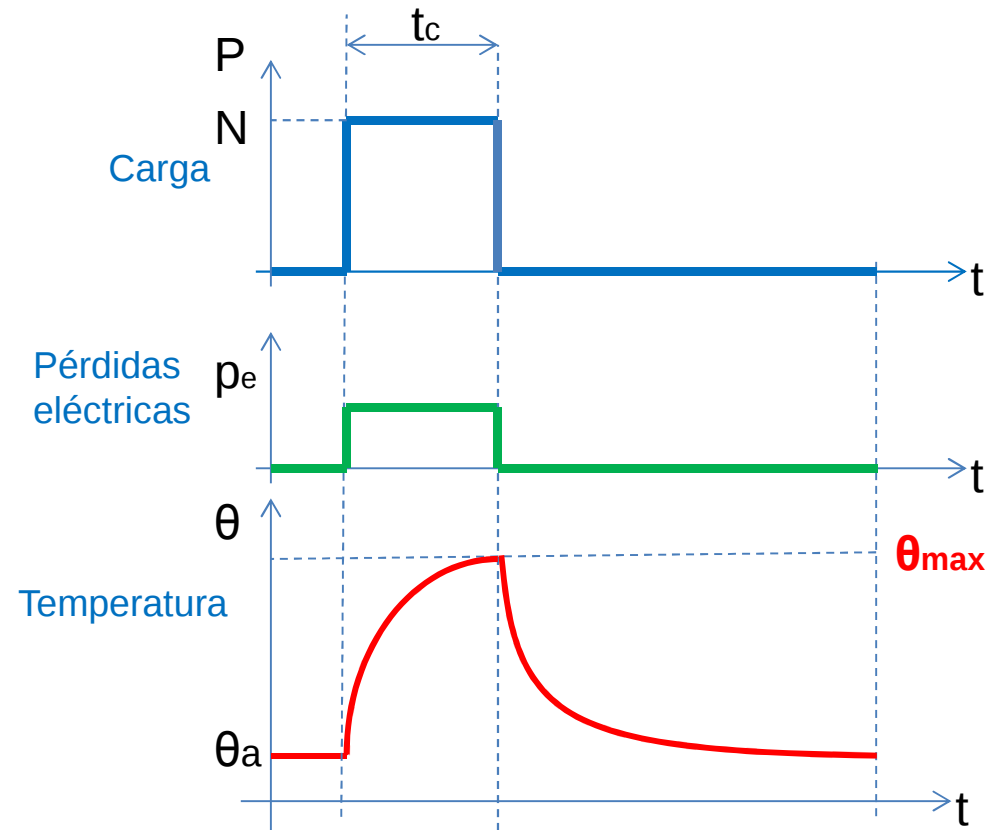
θ_{max} = Temperatura máxima alcanzada

CLASES DE SERVICIO DE LAS MÁQUINAS ELECTRICAS

(Según UNE 20-113-73)

S2: Servicio temporal

Funcionamiento en un estado de carga constante, como el mostrado en la Figura, que, no obstante, no dura lo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico y con un intervalo posterior que dura hasta que la máquina alcanza la temperatura ambiente (θ_a). El período de carga $t_c \leq 3\tau$.



N = Funcionamiento en régimen nominal

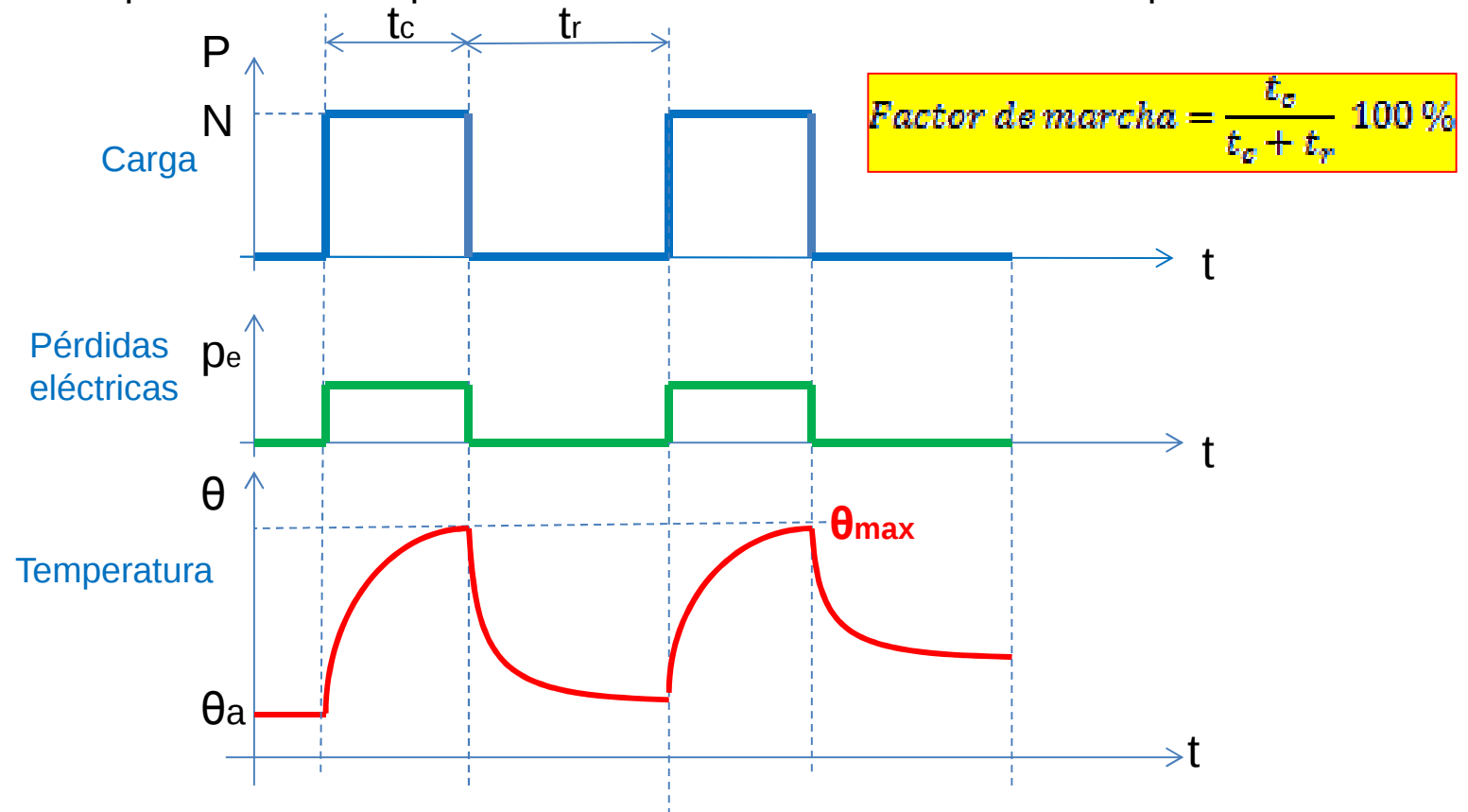
θ_{max} = Temperatura máxima alcanzada

CLASES DE SERVICIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(Según UNE 20-113-73)

S3: Servicio intermitente periódico

Se trata de una serie continua de ciclos iguales. Cada ciclo se compone de un período de carga constante seguido de un período de reposo, siendo la duración de cada ciclo tal que en ninguno de ellos se alcanza el equilibrio térmico. Además se considera que los sucesivos arranques no afectan prácticamente al calentamiento de la máquina.



N= Funcionamiento en régimen nominal

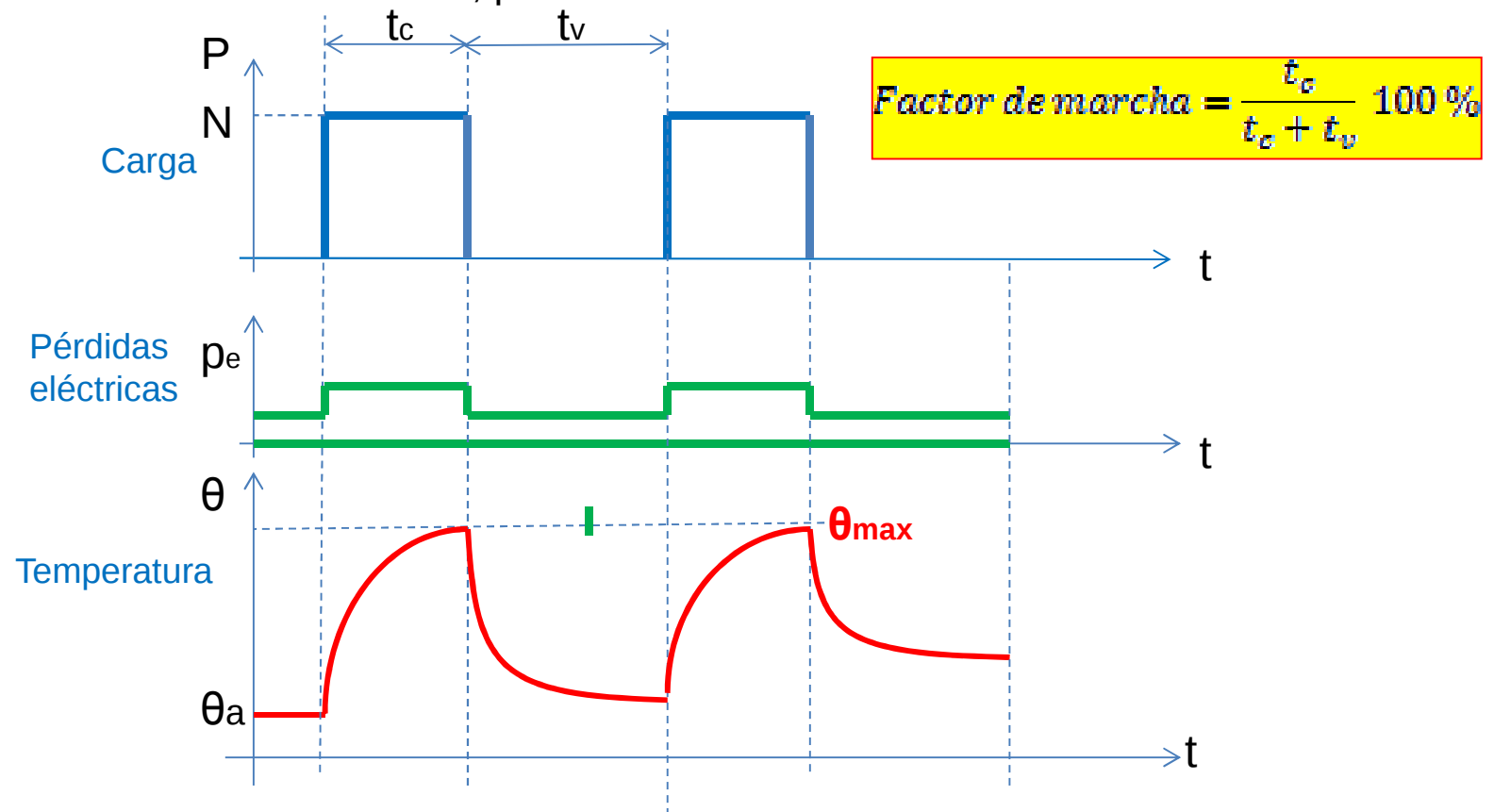
θ_{max} = Temperatura máxima alcanzada

CLASES DE SERVICIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(Según UNE 20-113-73)

S6: Servicio ininterrumpido periódico

Se trata asimismo de una serie continua de ciclos iguales, como en el servicio S3, pero en que se sustituye el período de reposo por uno de marcha en régimen de vacío. En el servicio S6, aunque existen las pérdidas de vacío, las condiciones térmicas pueden ser más favorables a las del servicio S3, por el efecto de una ventilación más eficaz.



N= Funcionamiento en régimen nominal

Theta_max = Temperatura máxima alcanzada