



Máquinas Eléctricas Rotativas

Los materiales utilizados en una máquina eléctrica pueden agruparse en:

- 1) Materiales magnéticamente blandos
- 2) **Materiales conductores eléctricos**
- 3) **Materiales aislantes**
- 4) Imanes permanentes



2) Materiales conductores eléctricos

Cobre

Cobre y sus aleaciones

Aluminio

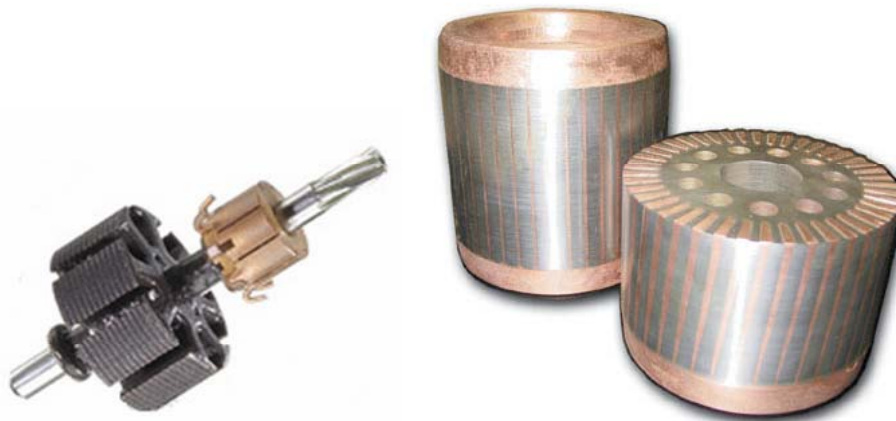




2) Materiales conductores eléctricos

Cobre

- ↑ Conductividad eléctrica (σ)
- ↓ Coeficiente de temperatura
- ↑ Resistencia mecánica (motaje)
- ↑ Comportamiento soldadura (motaje)
- ↑ Facilidad de fabricación conductores

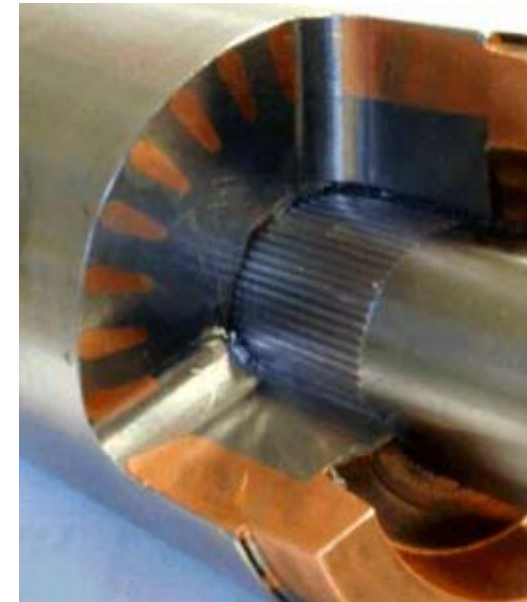




2) Materiales conductores eléctricos

Cobre

- ↑ Conductividad eléctrica (σ)
- ↓ Coeficiente de temperatura
- ↑ Resistencia mecánica (motaje)
- ↑ Comportamiento soldadura (motaje)
- ↑ Facilidad de fabricación conductores





2) Materiales conductores eléctricos

Cobre y sus aleaciones

El cobre es un metal altamente maneable y dúctil:

- Fundido
- Forjado
- Laminado
- Estirado
- Mecanizado

Por sus buenas propiedades eléctricas y mecánicas el cobre es:

El material eléctrico más utilizado en el bobinado de las ME

- Hilo barnizado
- Pletinas (> 500 V)
- Delgas

Las aleaciones mejoran el comportamiento mecánico y empeoran el eléctrico.



2) Materiales conductores eléctricos

Aluminio

60 % de la conductividad eléctrica del cobre

Mecánicamente menos resistente que el cobre (no permite fabricar hilos finos)

Menos pesado y más barato que el cobre

Menor temperatura de fusión (bueno para fundir)

Su principal aplicación en ME es la de fabricación de jaulas de ardilla por fundición



3) Materiales aislantes.

An insulator refers to a nonconducting material or an insulating material with a very low conductivity.

An insulation system comprises insulating materials and insulation distances.

The main function of insulation is to separate components of **different electric potentials** or of different electric circuits.

Insulators also have to act as heat conductors between the winding and the surroundings, and they have to protect the winding from external stresses such as dirt, moisture and chemicals.



3) Materiales aislantes.

Aislamiento

The primary purpose of ELECTRICAL insulation is to withstand:

- turn-to-turn,
- phase to-phase
- phase-to-ground voltage

such that to direct the currents through the desired paths of windings.



3) Materiales aislantes.

The most common insulating materials in electrical machines are easily listed:

- mica,
- polyester films,
- aramid paper
- and epoxy or polyester resins.

Insulation of Rotating Electrical Machines

(Tema 8. Tapani Jokinen – Ed. Wiley)

Insulation can be roughly divided into two main categories:

- groundwall
- and conductor insulation.



3) Materiales aislantes.

The main types of insulation are:

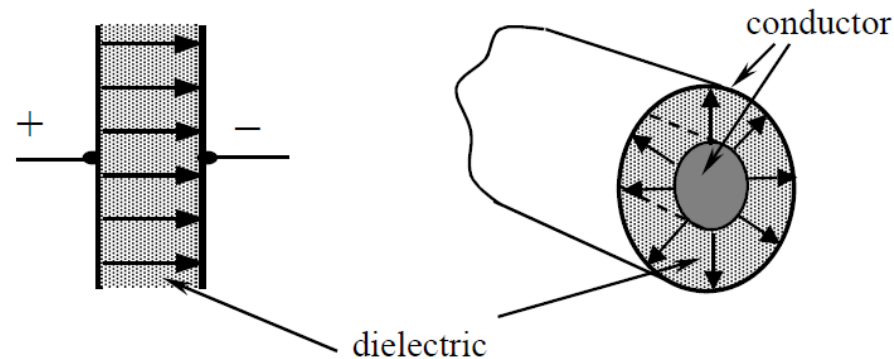
- slot insulation and the slot closer;
- phase-to-phase insulation in the slot and in the coil end;
- pole winding insulation;
- insulation of the connection leads and the terminals;
- impregnating varnish and resin;
- and surface varnish and protective paint.



3) Materiales aislantes.

Dielectric strength and dielectric breakdown

In a dielectric filled capacitor or in a coaxial cable, for example, there is an electric field across the dielectric/insulator:



If this electric field is sufficiently strong electrons in the dielectric material are 'ripped' free of their host atoms/molecules. These freed electrons can collide with other electrons in the dielectric material causing them to be released also (a sort of 'chain reaction') and a current can then flow in the dielectric (which was acting as an insulator).

This process occurs when the **dielectric strength** of the material is exceeded. The dielectric strength is the electric field value (E volts per metre (V/m)) at which this **dielectric breakdown** occurs.



3) Materiales aislantes.

The electric field strength E in a single material of thickness d is

$$E = \frac{U}{d} = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{J}{\sigma} \quad (\text{V/m})$$



3) Materiales aislantes.

Requerimiento del aislamiento

Insulation systems are characterized by **voltage** and **temperature** requirements.

The insulation has to withstand the expected operating voltages between conductors, (phase) conductors and ground, and phase to phase.

Aislamiento del laminado del estator

The stator laminations are insulated from each other by special coatings(0.013 mm thick) to reduce eddy current core losses.



3) Materiales aislantes.

Garantizan las trayectorias de las corriente (A-V): conductor-conductor-masa-tierra

- ↑ Permitividad electrica (ϵ) [F/m]
- ↑ Conductividad térmica (λ) [W/m]

material	ϵ relativo ($\epsilon_0 = 1$)
aire	1.0006
teflón	2.0
polipropileno (MKP)	2.1
poliestireno	2.5
policarbonato (MKC)	2.9
poliéster / mylar (MKT)	3.2
vidrio	4.0 - 8.5
mica	6.5 - 8.7
cerámica	6.0 - 50,000
óxido de aluminio	7.0
óxido de tántalo	11.0



3) Materiales aislantes.

Garantizan las trayectorias de las corriente (A-V): conductor-conductor-masa-tierra

Rigidez dieléctrica: [kV/cm]

Porcelana 16 a 79

Parafina 80 a 120

Aceite de transformador 200

Bakelite 120 a 220

Goma 200 a 300

Polímeros 50 a 900

Papel 500

Teflón 600

Vidrio 800 a 1200

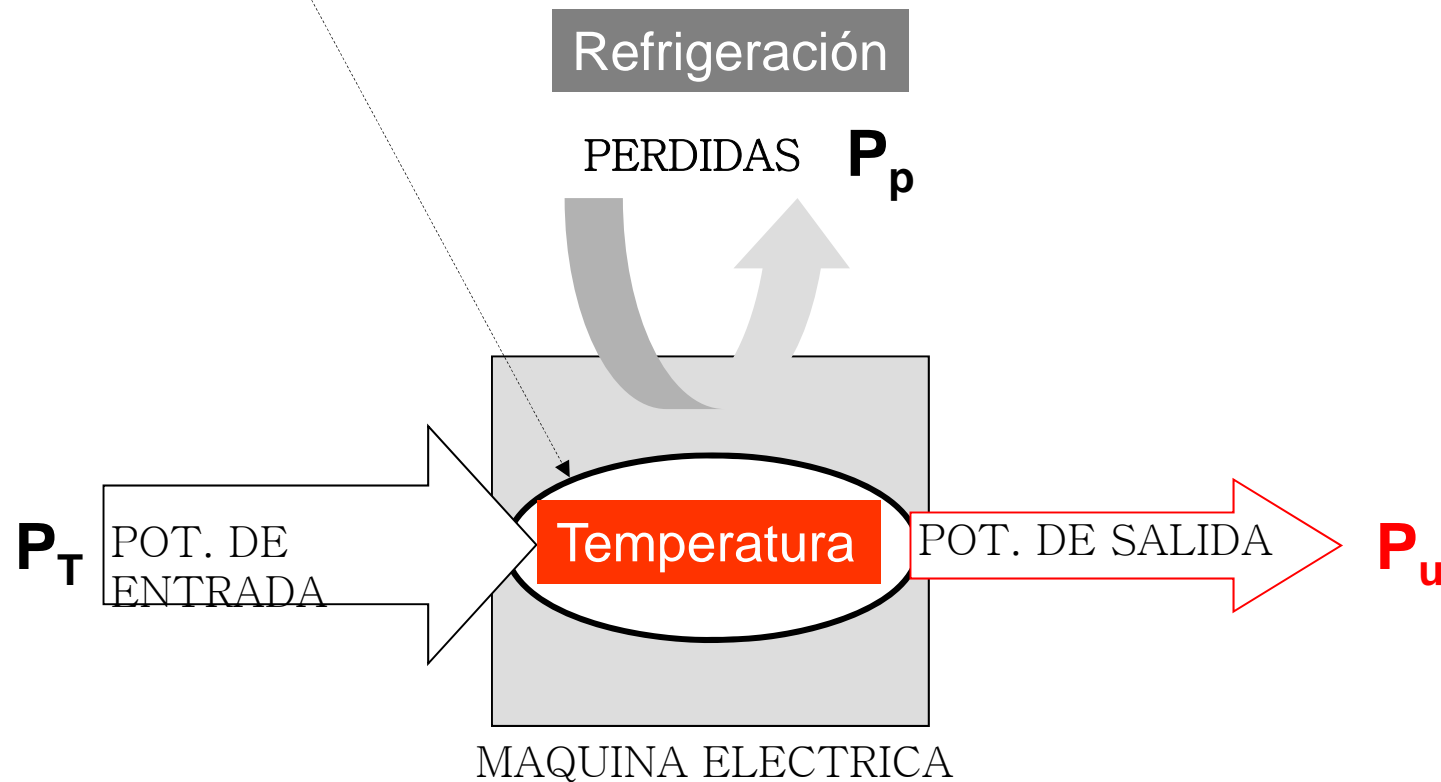
Papel aceite 1800

Mica 2000



3) Materiales aislantes.

Los aislantes son el elemento más vulnerables térmicamente en la ME





3) Materiales aislantes

Temperatura

Los aislantes son el elemento más vulnerables térmicamente en la ME

Refrigeración

Entonces, a pesar de que sobre la vida de los aislantes influyen :

- las vibraciones
- la humedad
- la suciedad
- etc.

es la temperatura el factor que tiene mayor peso.

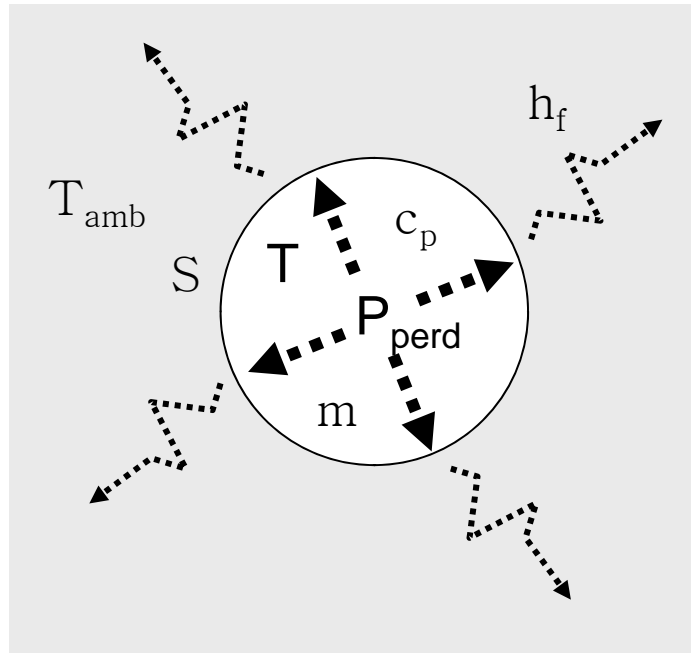
TEMPERATURA DE REGIMEN:

temperatura máxima que pueden soportar los aislantes eléctricos.



3) Materiales aislantes

INCREMENTO DE TEMPERATURA CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO IDEAL



$(m c_p)$: Capacidad calorífica [kg] [J /kg °C] = [kg] [W seg/kg °C]

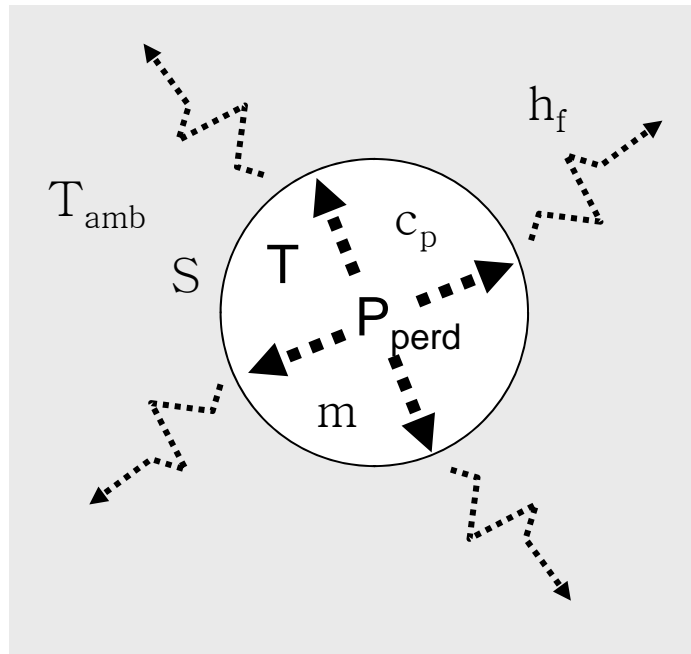
P_{perd} : Fuentes internas de calor (Pérd. en la máq. eléctrica) [W]

h_f : Coeficiente de transferencia de calor [W/m² °C]



3) Materiales aislantes

INCREMENTO DE TEMPERATURA CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO IDEAL



El equilibrio térmico con el medio ambiente vendrá dado por:

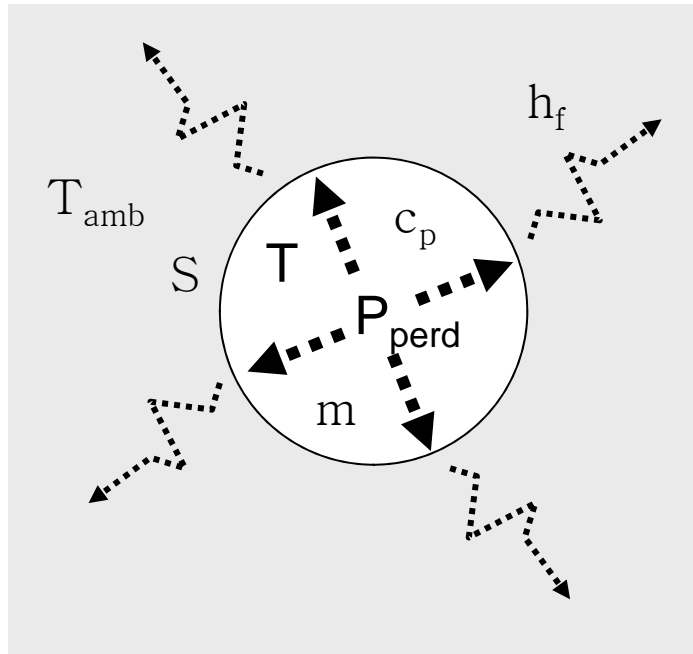
$$P_{\text{perd}} dt = s h_f T_{\text{incr}} dt + m c_p dT_{\text{incr}}$$

$$T = T_{\text{amb}} + T_{\text{incr}} (1 - e^{-t/\tau})$$



3) Materiales aislantes

INCREMENTO DE TEMPERATURA CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO IDEAL



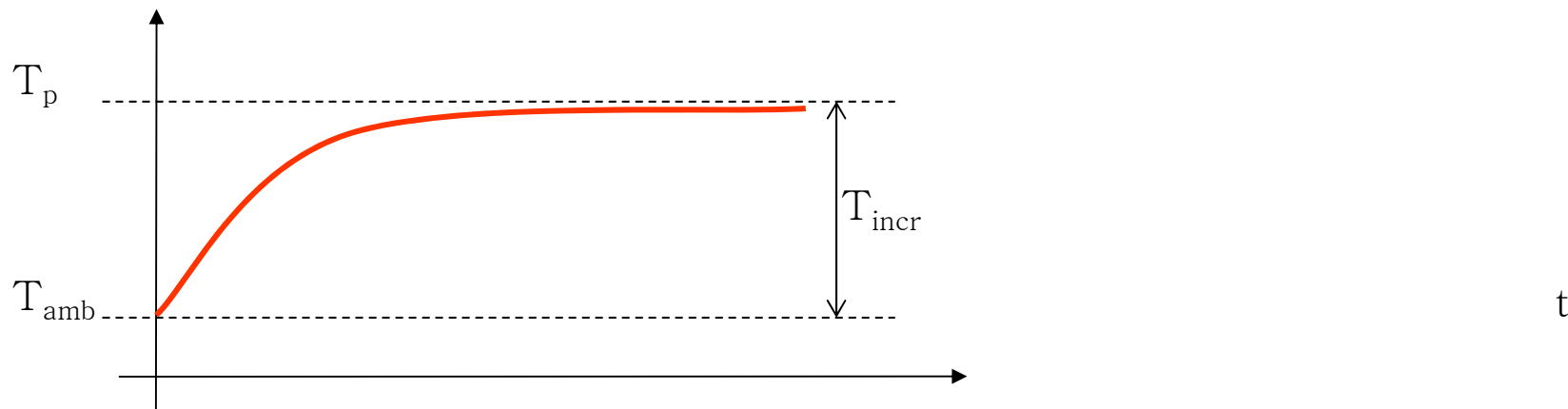
$$T = T_{amb} + T_{incr} (1 - e^{-t/\tau})$$

Calentamiento

$$T_{incr} = T_p - T_{amb} = P_{perd} / (S hf)$$

$$T_p = T_{amb} + T_{incr}$$

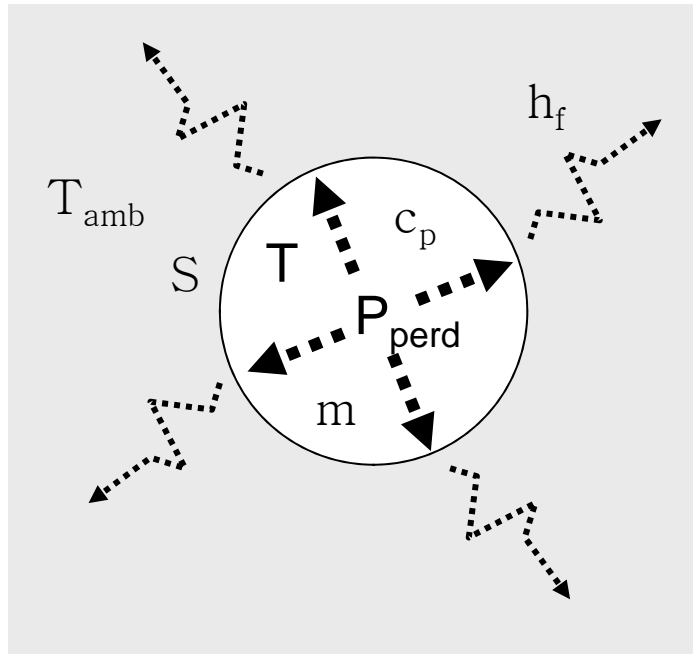
$$\tau = m cp / (S hf) : \text{Constante de tiempo térmica}$$





3) Materiales aislantes

INCREMENTO DE TEMPERATURA CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO IDEAL



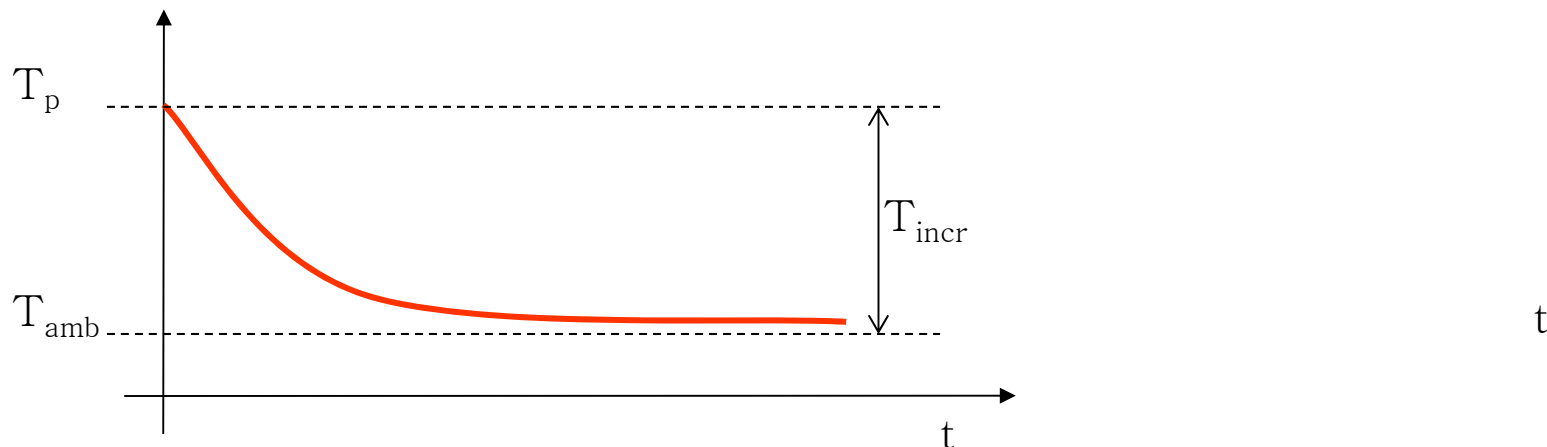
$$T = T_{\text{amb}} + T_{\text{incr}} (1 - e^{-t/\tau})$$

Enfriamiento

Cesan las fuentes internas de calor: $P_{\text{perd}} = 0$

$$0 = s h_f T_{\text{incr}} dt + m c_p dT_{\text{incr}}$$

$$T = T_{\text{amb}} + T_{\text{incr}} (e^{-t/\tau})$$



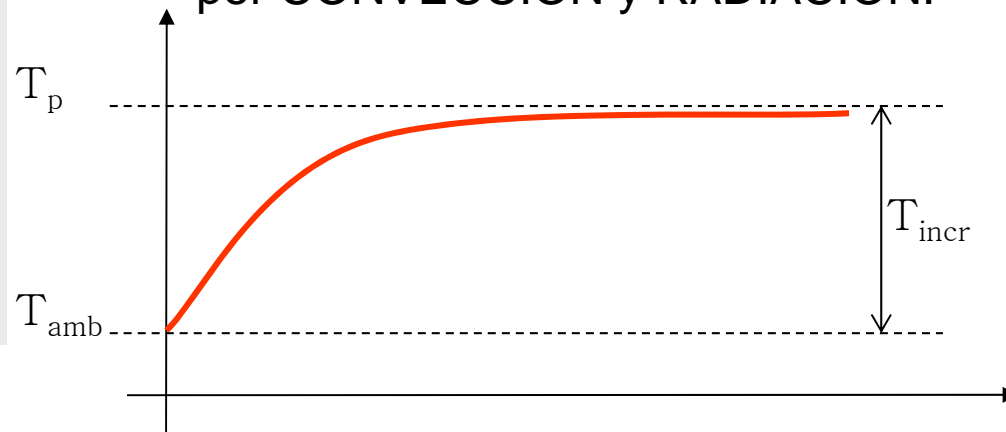
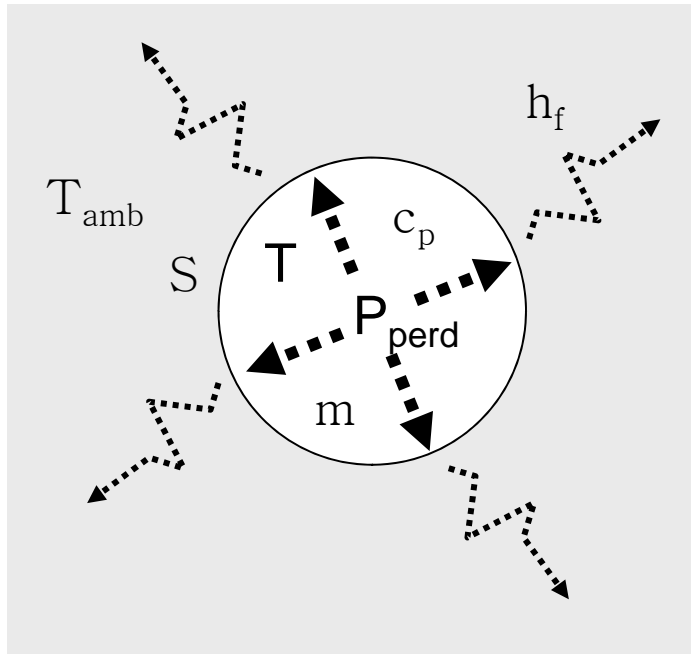


3) Materiales aislantes

INCREMENTO DE TEMPERATURA CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO IDEAL

Particularizando para máquinas eléctricas

Generalmente se **TRANSMITE** por CONDUCCION entre sus elementos, y se **DISIPA** al ambiente por CONVECCION y RADIACION.



$$T_p = T_{amb} + T_{incr} = T_{amb} + P_{perd}/(S h_f)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{perd} = CTE \\ S \\ h_f \end{array} \right\} \text{DISIPACION CALOR} \downarrow \text{REFRIGERACION}$$

TEMPERATURA DE REGIMEN (T_p):

temperatura máxima que pueden soportar los aislantes eléctricos.



3) Materiales aislantes

El diseñador debe asegurarse de que los materiales aislantes utilizados en la máquina pueden soportar el incremento de temperatura en condiciones de carga.

El punto débil de la máquina por el que puede fallar ésta son los aislantes a causa del estrés térmico (y eléctrico).

Otro aspecto interesante, es que el material aislante ocupa más espacio en la máquina que el material conductor.



3) Materiales aislantes

Por norma (IEC 85 1984 o UNE 20 – 304) los materiales aislantes se clasifican en siete categorías.

AISLAMIENTO	$T_p = T_{inc} + T_{amb}$
Clase Y	90 °C
Clase A	105 °C
Clase E	120 °C
Clase B	130 °C
Clase F	150 °C
Clase H	175 °C
Clase C	ensayo



3) Materiales aislantes

Propiedades que deben cumplir los aislantes

Poco espesor

Fácil de aplicar

Resistente a la abrasión



Imanes permanentes

Los imanes permanentes en las ME desempeñan la misma misión que los bobinas inductoras alimentadas con corriente continua.

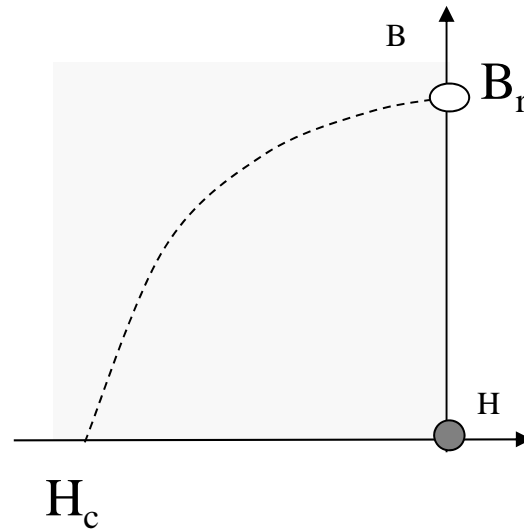
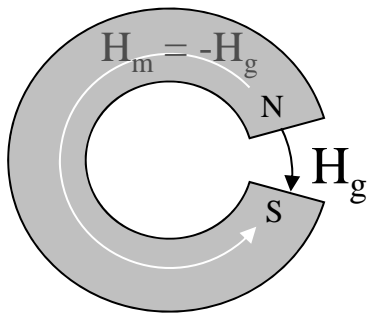
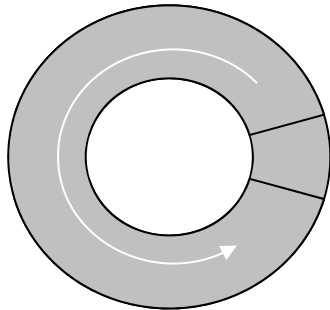
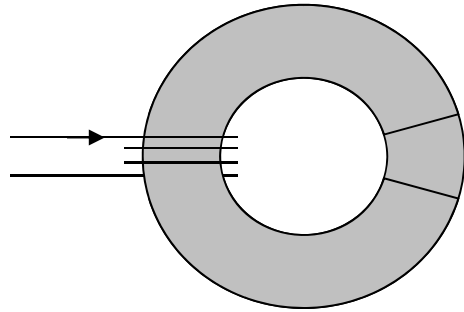
La ventaja del imán es que no consume energía en el funcionamiento de la máquina.

http://www.ima.es/index_esp.htm

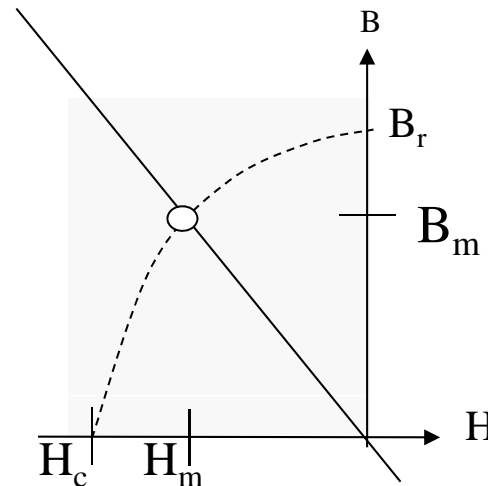




Imanes permanentes

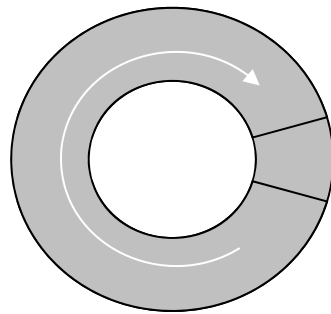


$$B_m = - \mu_0 [(S_g/S_m)(l_m/l_g)] H_m$$

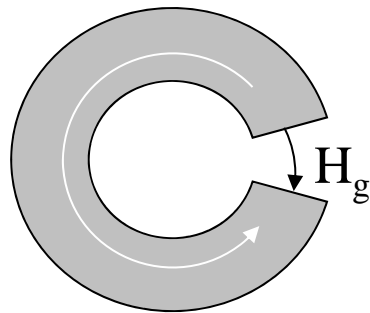




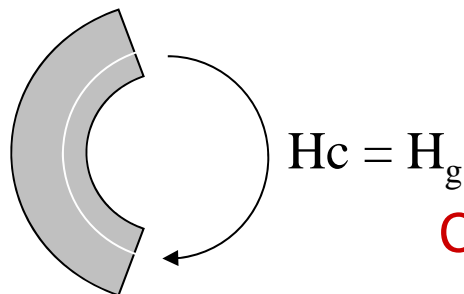
Imanes permanentes



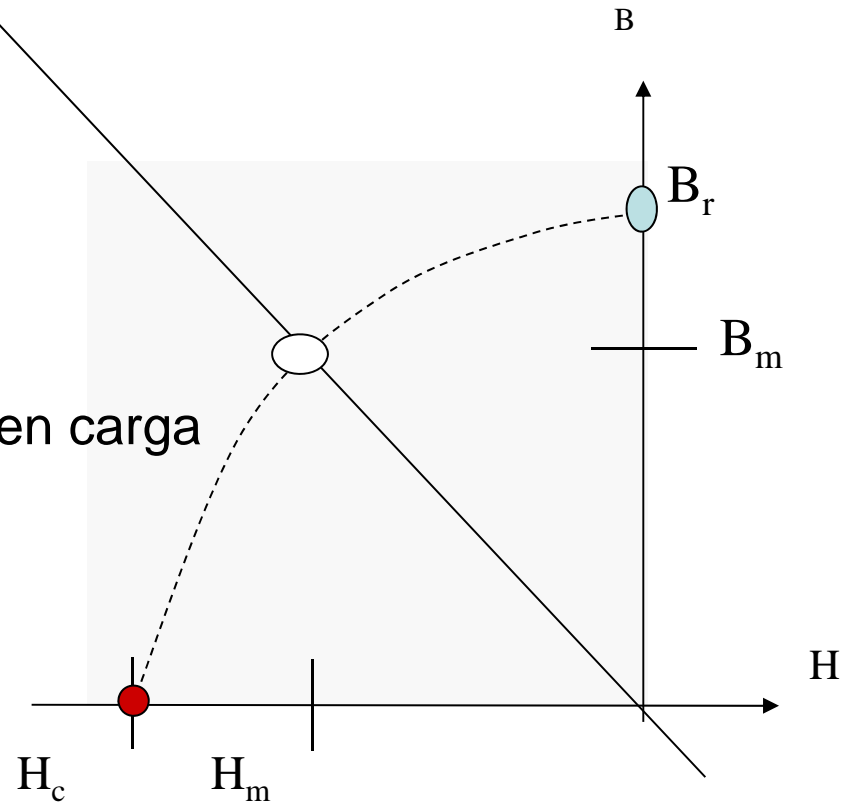
Cortocircuito



Circuito en carga



Circuito abierto



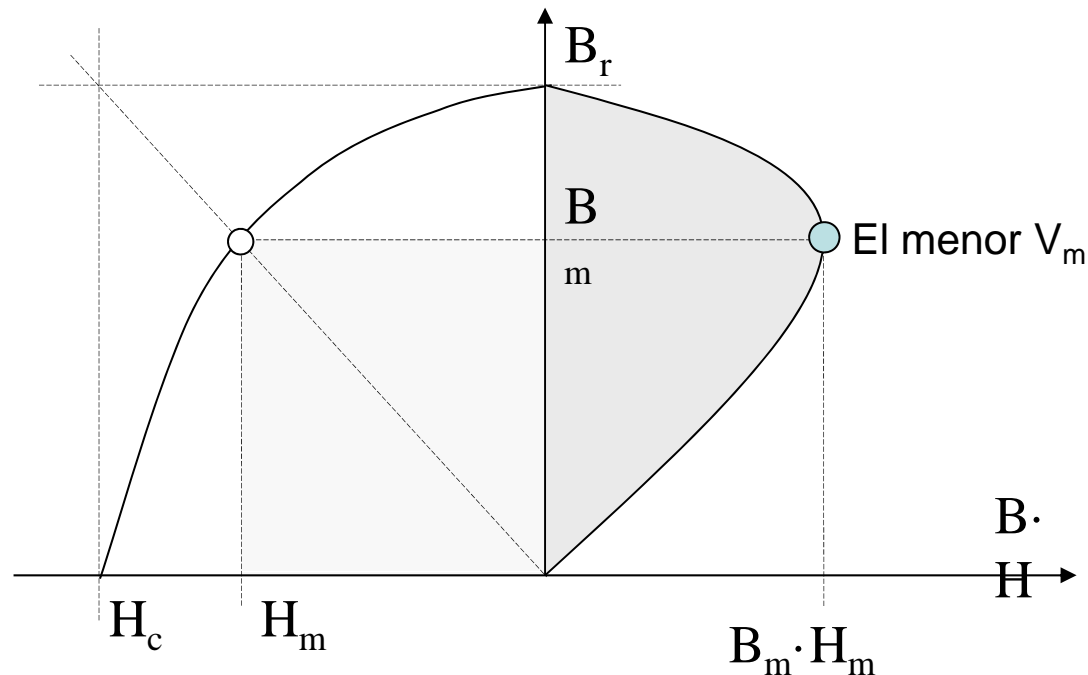


Imanes permanentes

El parámetro más apropiado para caracterizar la calidad del imán es el producto de la energía máxima $(BH)_{max}$

$(BH)_{max}$ representa la ENERGIA MAXIMA disponible en el imán

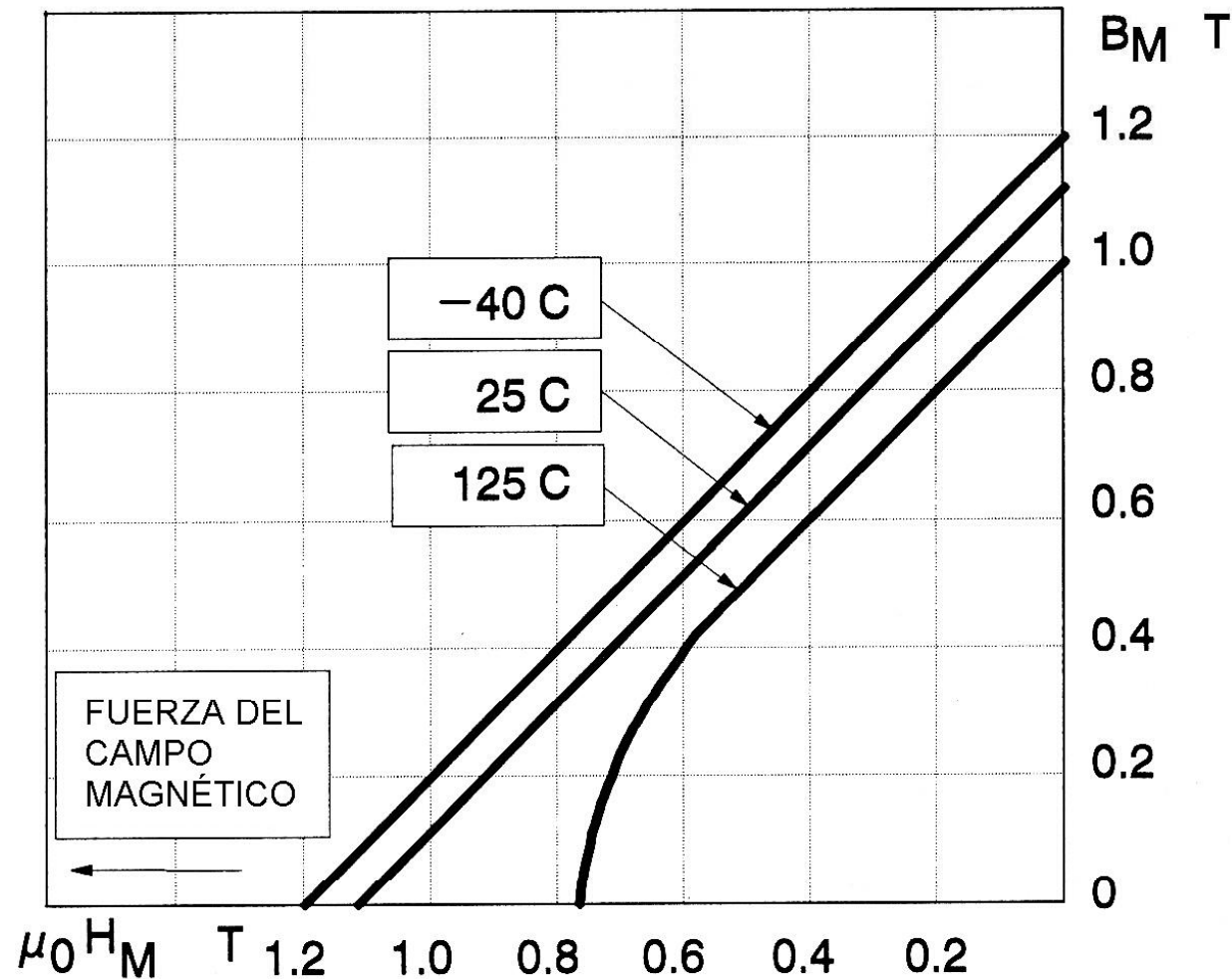
Para un determina entrehierro, el volumen mínimo de imán, se encuentra en el punto de $(BH)_{max}$





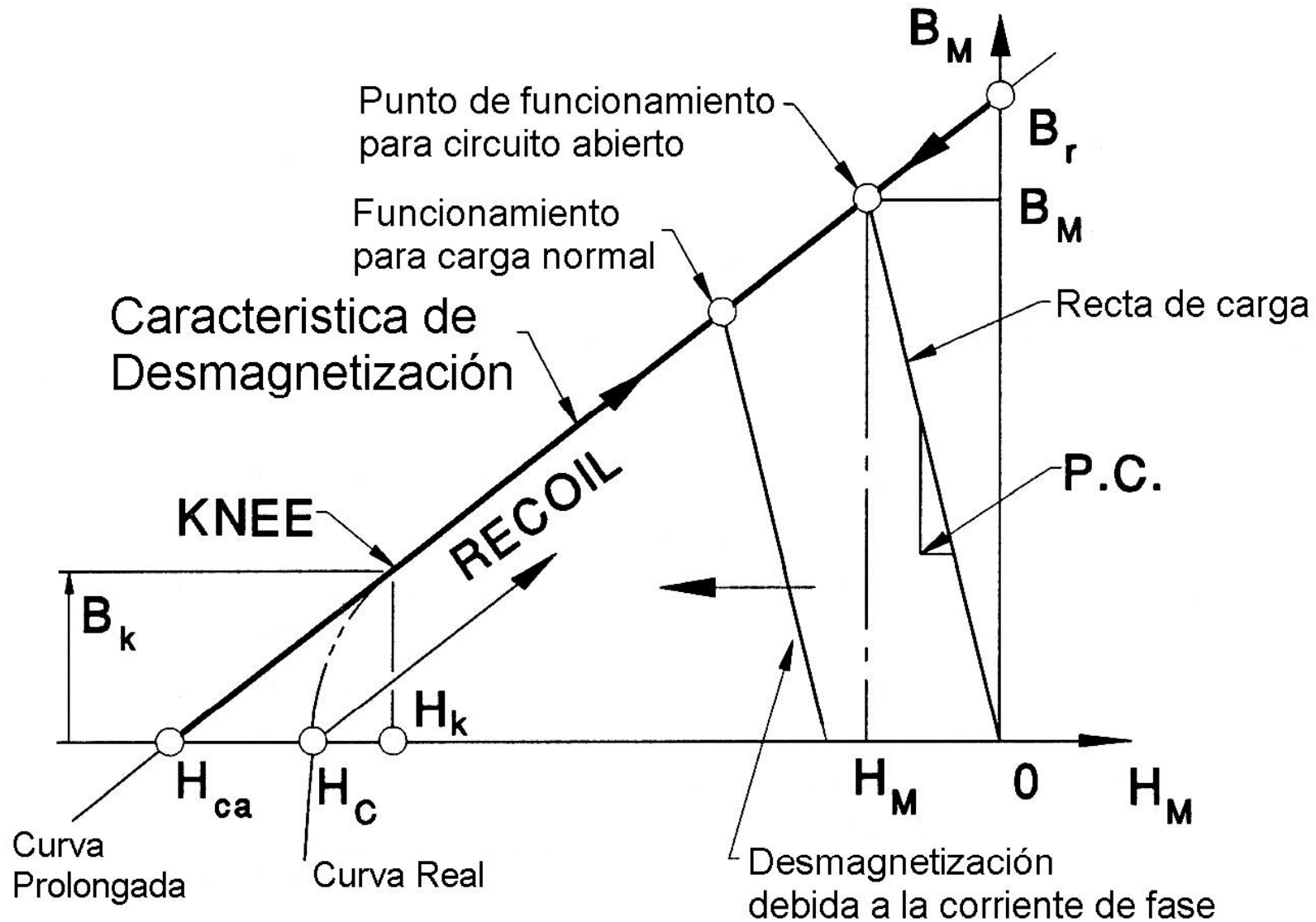
Imanes permanentes

Influencia de la temperatura (temperatura Curie)





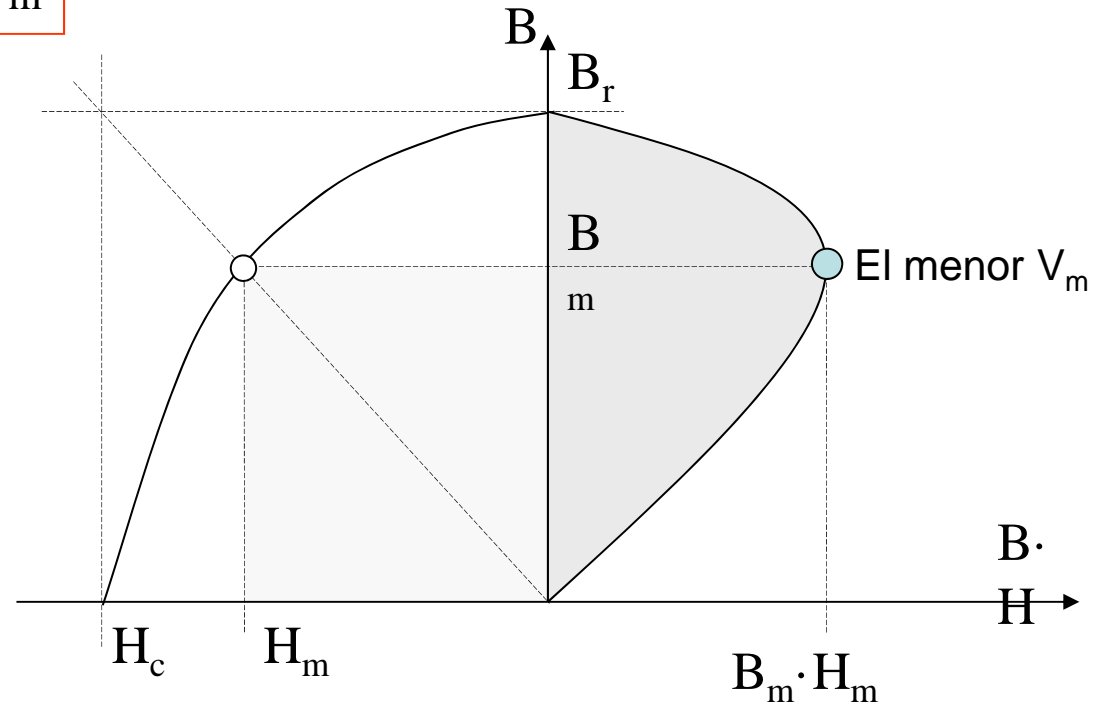
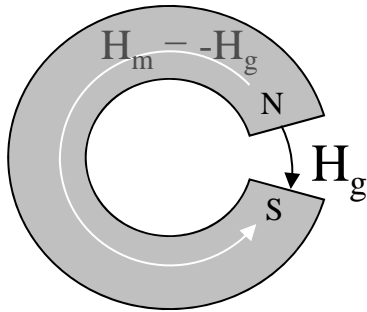
Imanes permanentes





Imanes permanentes

$$B_m = - \mu_0 [(S_g/S_m)(l_m/l_g)] H_m$$



Dimensionamiento del volumen del imán según el entrehierro:

$$B_g = \sqrt{(B_m H_m) \mu_0 (V_m/V_g)}$$



Imanes permanentes

Aceros: al cromo, al tungsteno, al carbono, al cobalto, . . .

Aleaciones especiales: Al-Ni-Fe-Co = Alnico

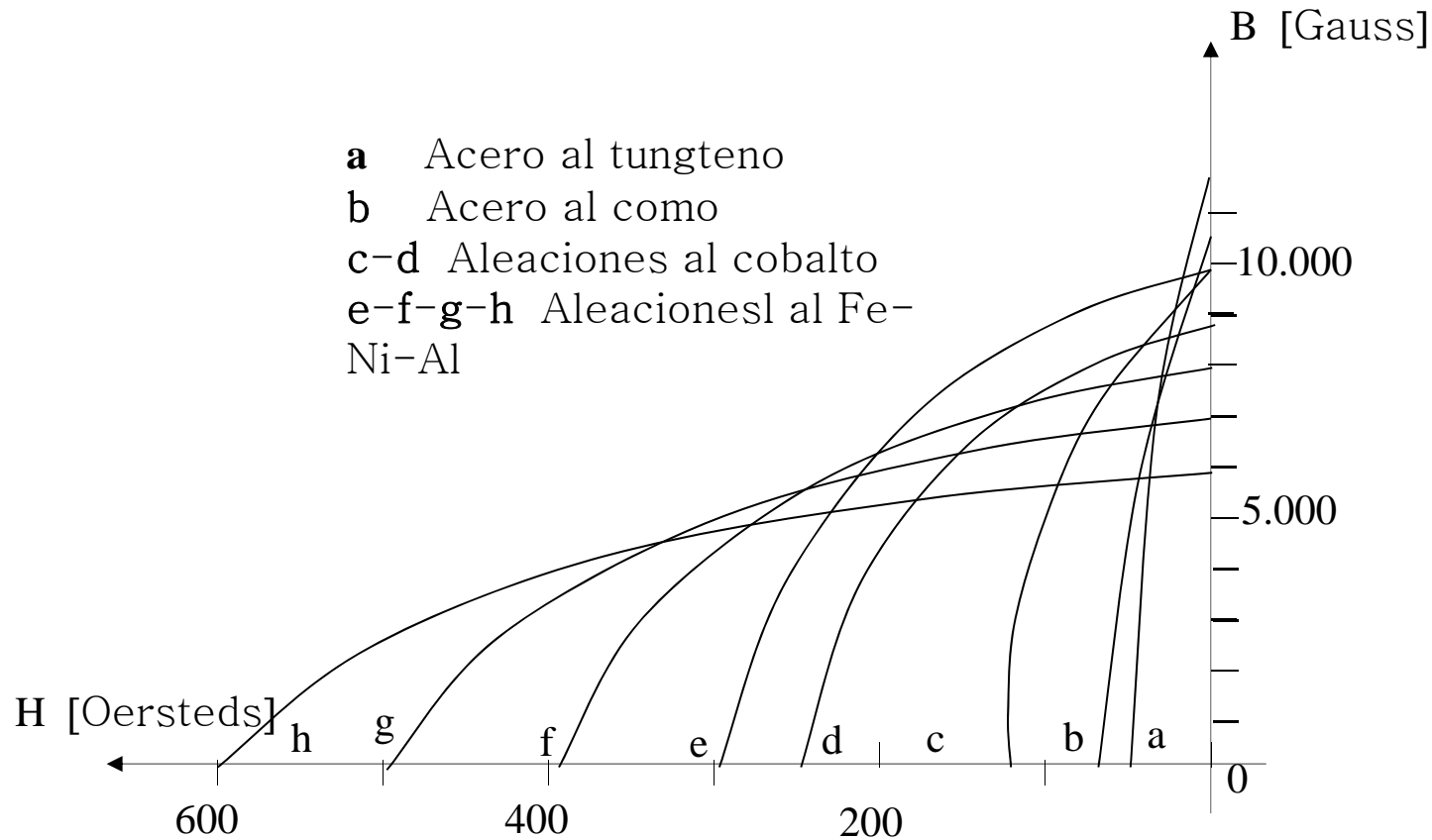
Materiales cerámicos (ferritas de bario, ferrita de estroncio)

Somariun-cobalto: Sm Co5

Neodymio-Hierro-Boro: Nd Fe B

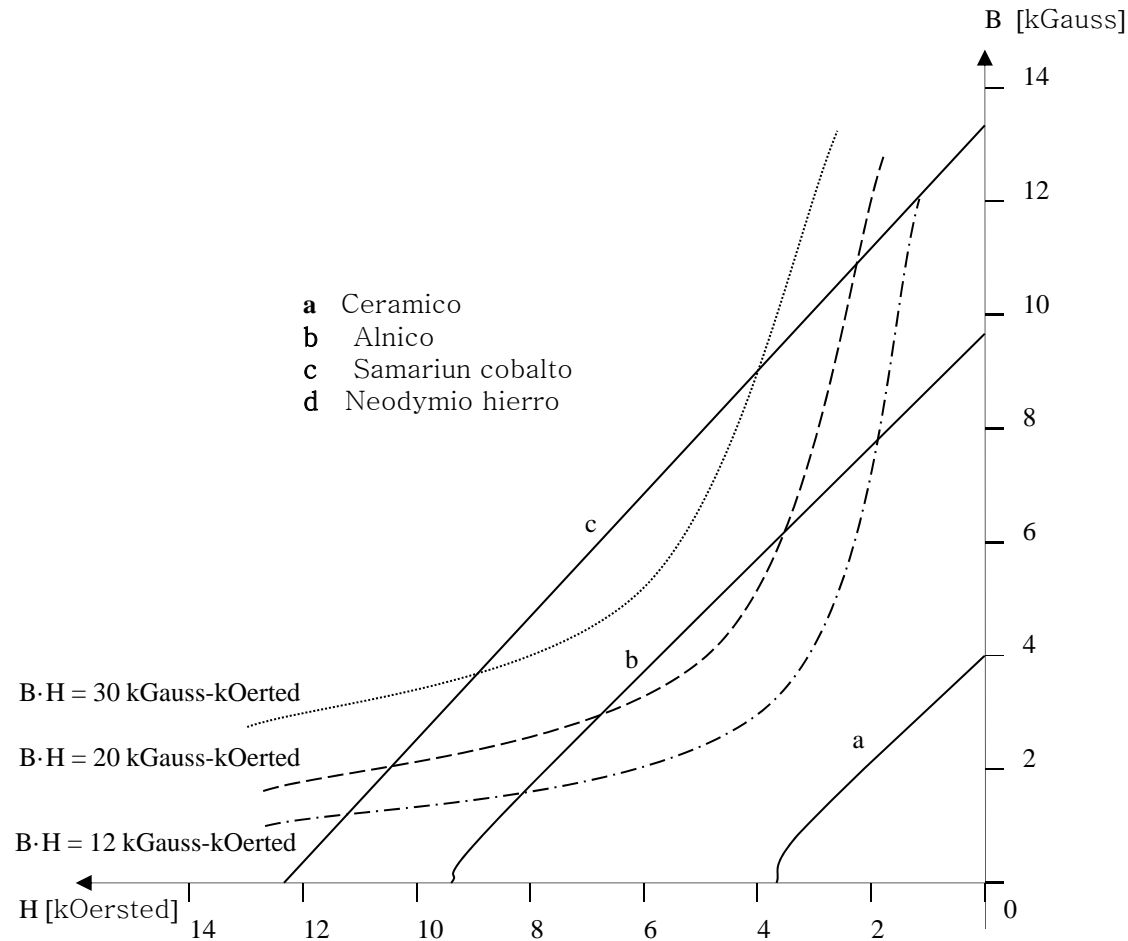


Imanes permanentes



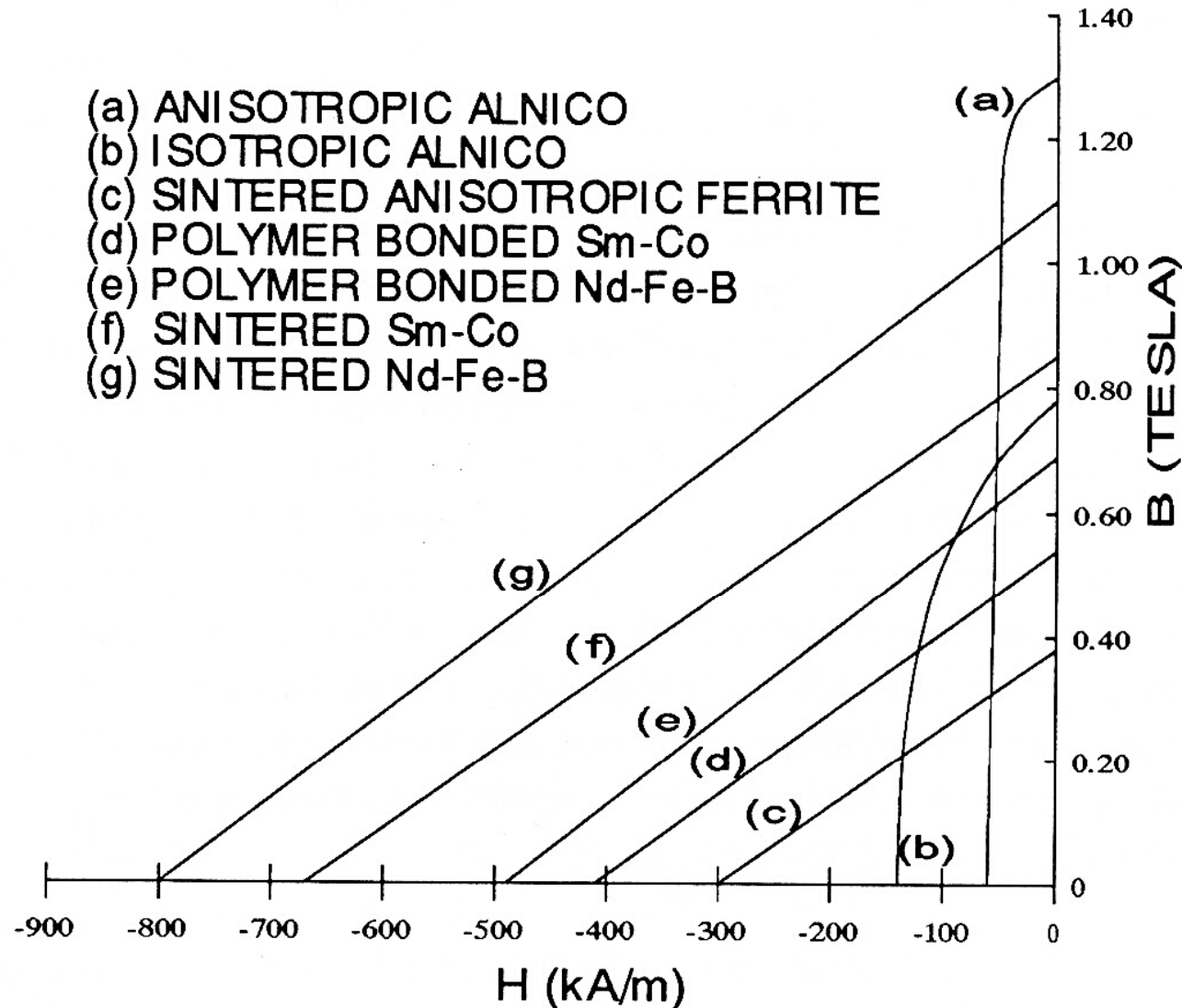


Imanes permanentes



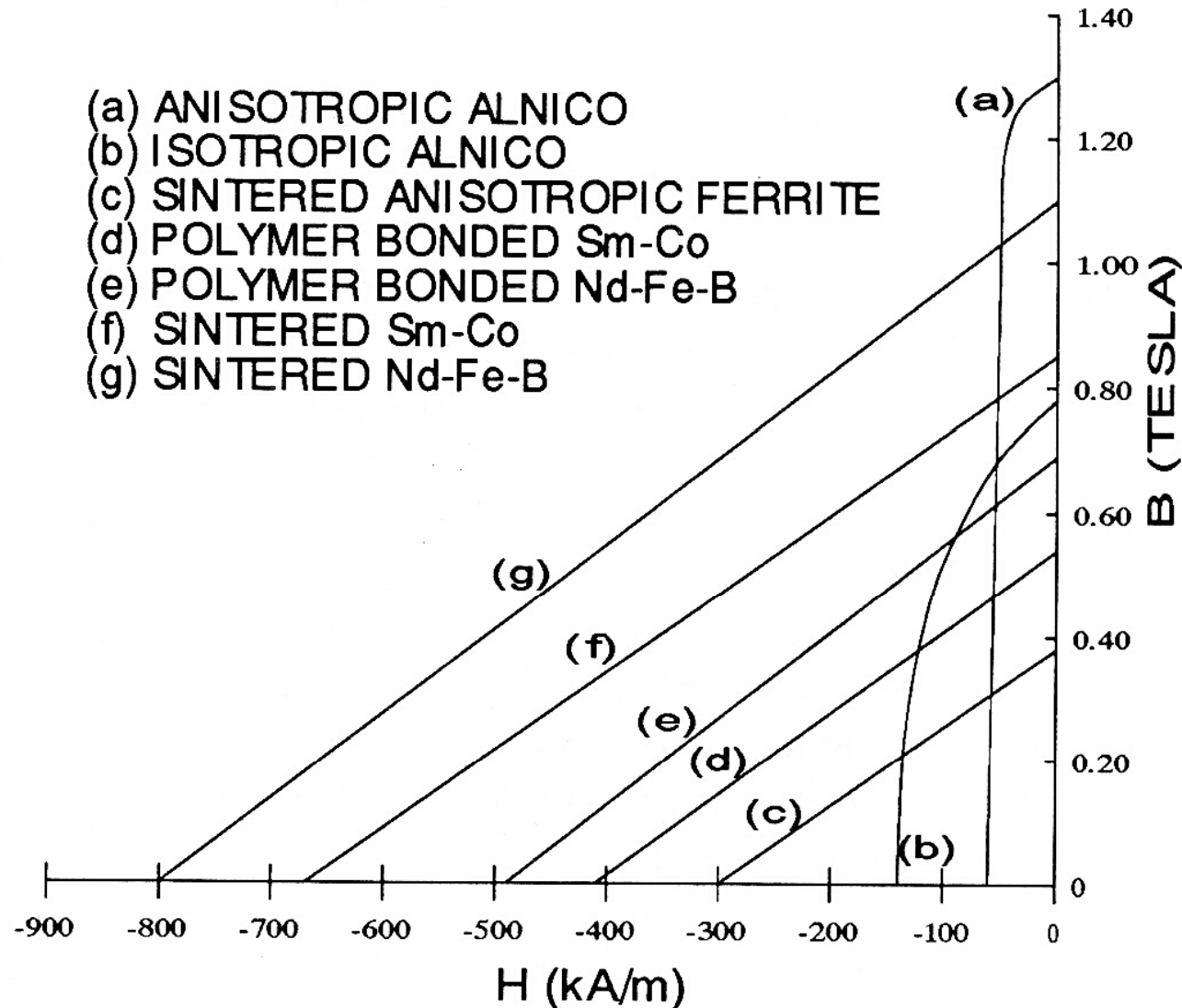


Imanes permanentes





Imanes permanentes





Imanes permanentes

MOTORES

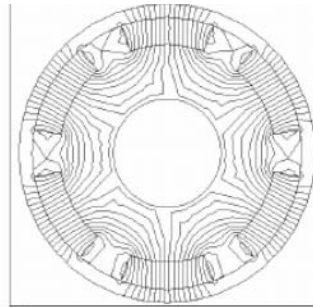
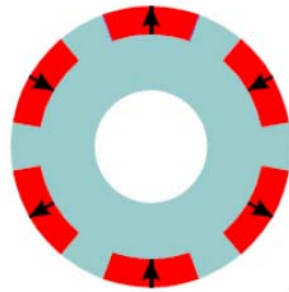


Figure 7. Inset magnet design

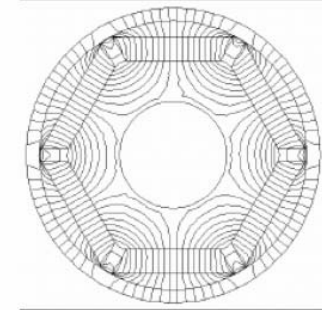
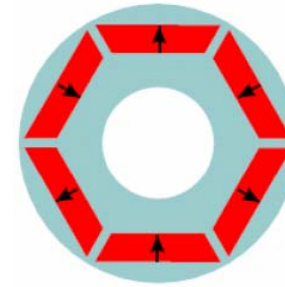


Figure 8. Interior Magnet Design

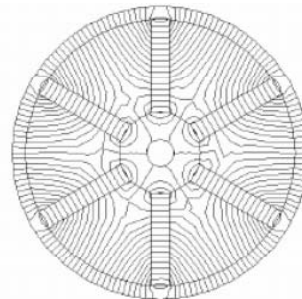
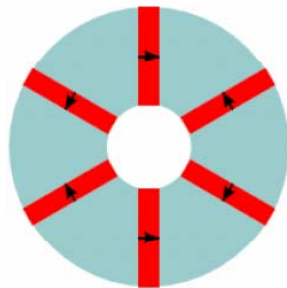
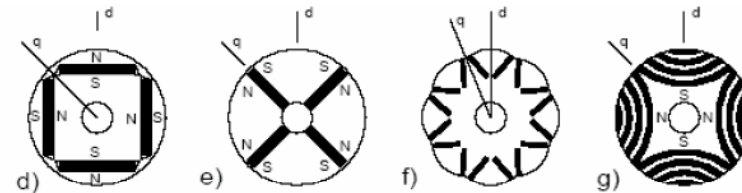


Figure 9. Flux Concentration Design





Imanes permanentes

MOTORES

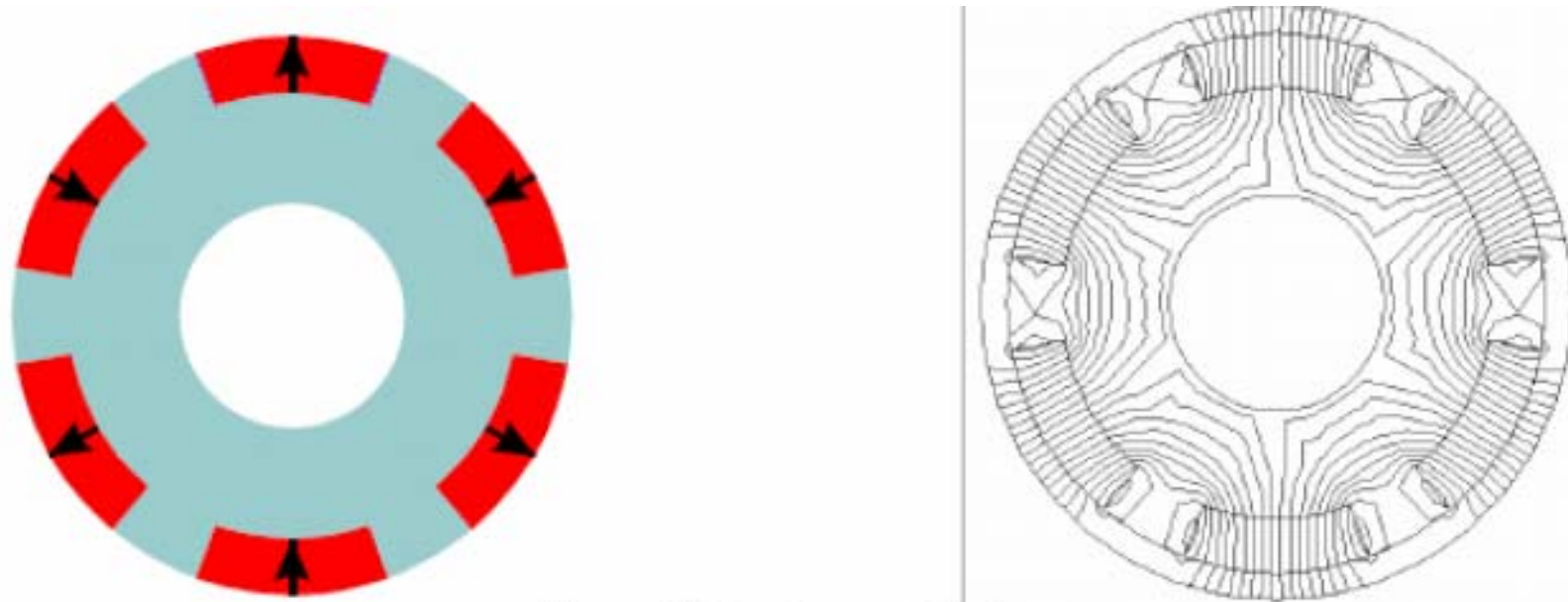


Figure 7. Inset magnet design



Imanes permanentes

MOTORES

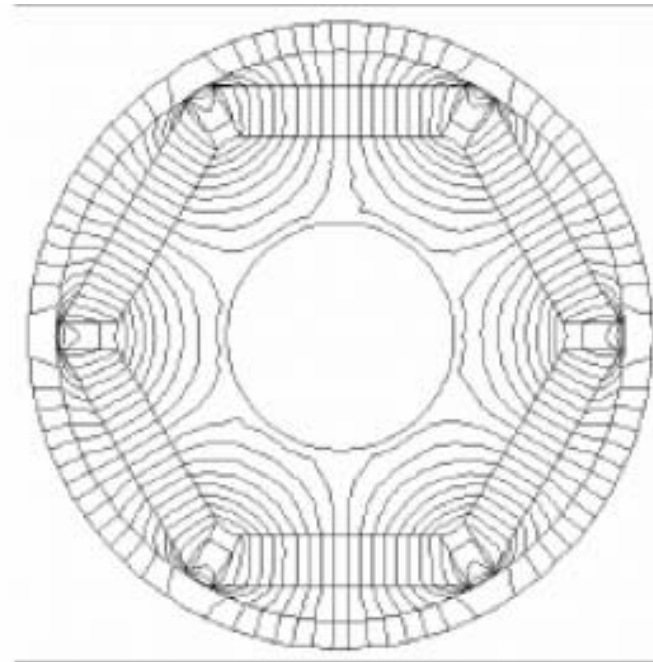
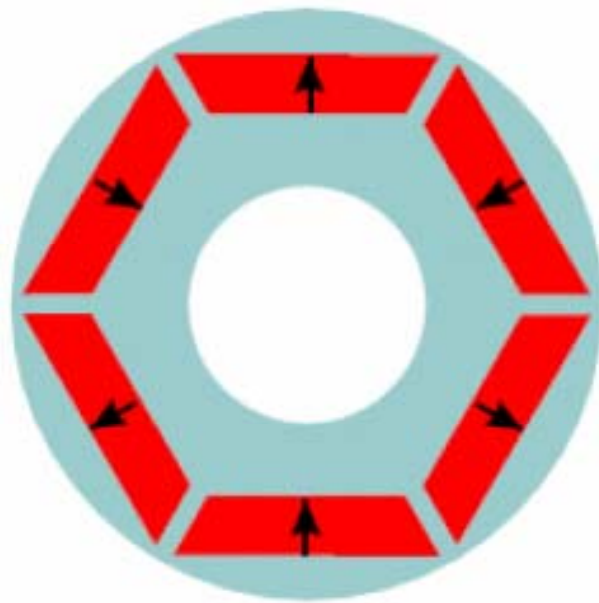


Figure 8. Interior Magnet Design



Imanes permanentes

MOTORES

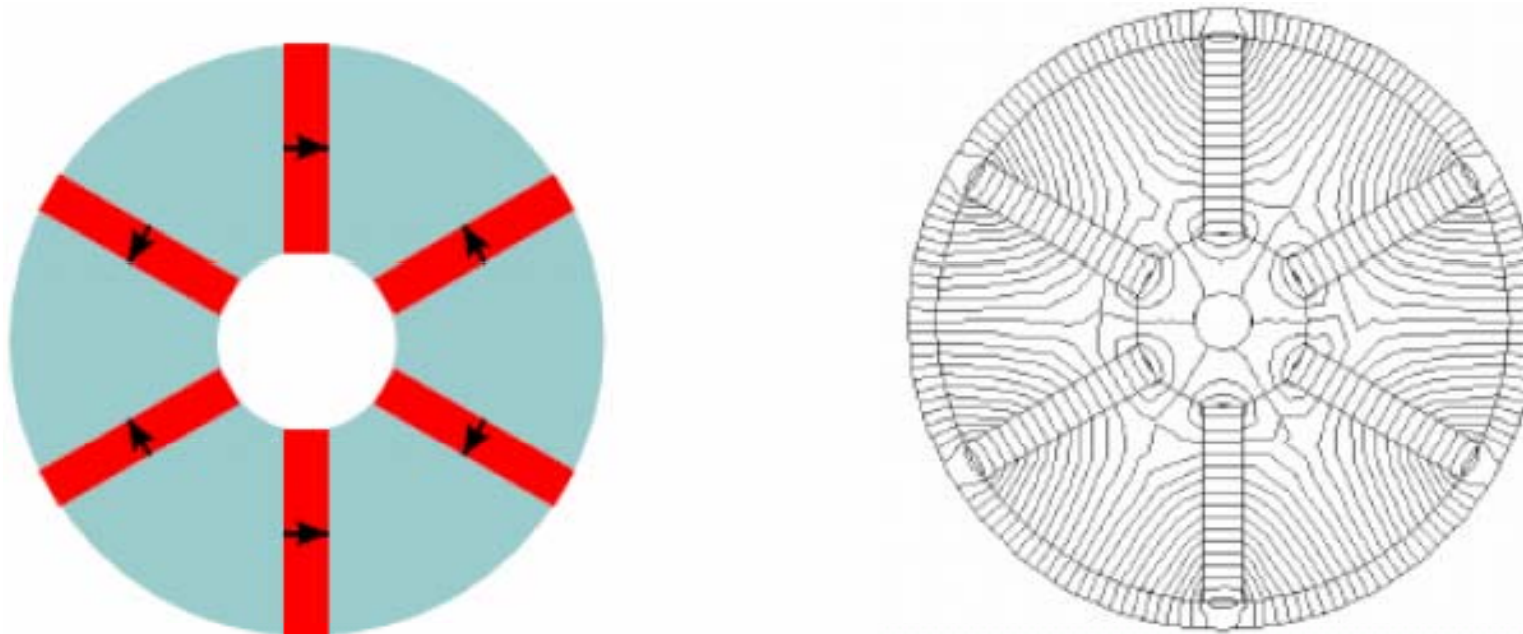


Figure 9. Flux Concentration Design



Imanes permanentes

MOTORES

