

Unidad VIII: Propiedades Magnéticas de la Materia.

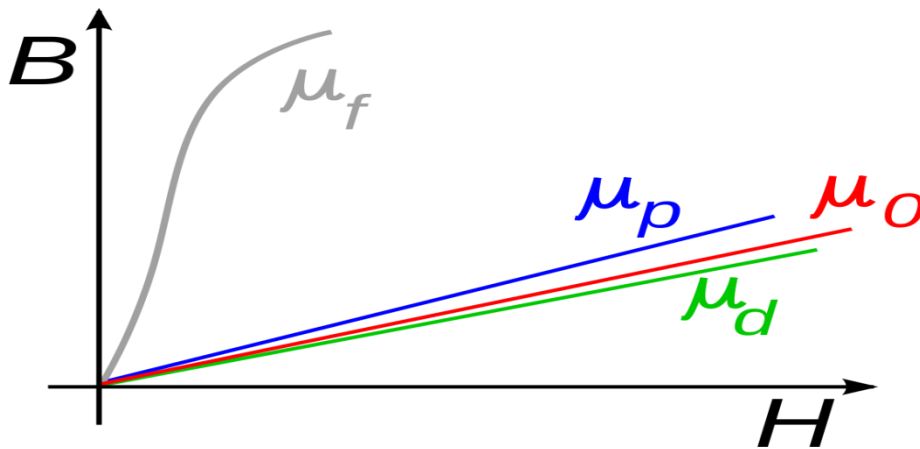
El campo magnético es fundamental en el funcionamiento de las máquinas eléctricas (generadores y motores), por lo que la utilización de materiales (ferromagnéticos) que puedan aumentar éste resultará en una disminución de energía eléctrica utilizada.

El ferromagnetismo justifica la utilización de materiales ferrosos como núcleo de las bobinas de motores y generadores.

Según las propiedades magnéticas, a los materiales los podemos clasificar en:

- **Ferromagnéticos:** son los que, ante la presencia de un campo magnético, se magnetizan y aumentan el mismo. Poseen una permeabilidad (μ_f) de valor muy superior a la del vacío (μ_0). En ésta categoría está el hierro y sus aleaciones.
- **Paramagnéticos:** son los que, ante la presencia de un campo magnético, se magnetizan muy poco, lo que hace que el mismo (el campo) tenga un aumento despreciable. Su permeabilidad (μ_p) es poco superior a la del vacío.
- **Diamagnéticos:** son los que repelen el campo magnético. Su permeabilidad (μ_d) es inferior a la del vacío.

Todas las sustancias (excepto el hierro y sus aleaciones), incluso los gases y líquidos están en las categorías de paramagnéticos y diamagnéticos.



Ver definición de H más adelante.

En los núcleos de las máquinas eléctricas se trabaja con un valor de permeabilidad dentro de la zona de proporcionalidad (aproximada) entre B y H .

Magnetización o imantación (M): es la cantidad de momentos dipolares magnéticos (mdm) por unidad de volumen de material, o sea $M = \text{m.d.m.} / \text{Volumen}$.

En la unidad VI definimos el m.d.m o simplemente momento magnético como el producto de la corriente en una espira por el área de la misma, o sea, $\mu = I A$ con lo que

$$\mathbf{M} = I A / \text{Vol.} = \text{Ampere metro}^2 / \text{metro}^3 = \text{Ampere} / \text{metro} = \text{A/m}$$

Si imaginamos la sección transversal de un trozo de material en el cual existe un pequeño B, dentro del mismo, existirían corrientes atómicas orientadas todas en el mismo sentido, de tal manera que internamente todas se cancelan, pero sobre la superficie existirá una corriente neta (corriente de imanación) similar a la corriente real de una espira conductora. Esta "corriente ficticia de imanación" es la que produce un aumento del campo B inicial.

O sea, al campo B creado en un material por una bobina se suma el campo aportado por el propio material, quedando:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M} \quad \text{donde}$$

B_0 es al campo creado por la bobina, o sea $\mu_0 n I$

B_m es el campo creado por el material por las **n corrientes (I) ficticias** de imanación, o sea,

$$\mathbf{B}_m = \mu_0 n I = \mu_0 N I / \text{Long} = \mu_0 N I A / \text{Long} A = \mu_0 \mathbf{M} \quad \text{donde:}$$

N son las espiras superficiales ficticias de corrientes de imanación.

I es la corriente ficticia de cada una de las N espiras ficticias.

Long es la longitud del núcleo de la bobina.

A es el área transversal del núcleo.

Se define **H como la intensidad de campo magnético** y **B como el campo magnético**, ambos son idénticos, solo se diferencian en μ_0 , o sea:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_0 / \mu_0 \quad \text{entonces}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \chi \mathbf{H} \quad \text{donde}$$

χ es la susceptibilidad del material (facilidad de imanarse), idéntica a la susceptibilidad definida en electrostática.

La magnetización es proporcional a la intensidad de campo H, o sea: **$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$** , tanto M como H se miden en Ampere /metro y **χ es adimensional**.

O sea:
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad \text{donde}$$

μ_r es la permeabilidad relativa del material (es adimensional y figura en tablas de materiales, al igual que la susceptibilidad).

Al producto de $\mu_r \mu_0$ se lo llama permeabilidad absoluta o total (μ_t). También $\mu_t = \mu_0 (1 + \chi)$

En **materiales paramagnéticos y ferromagnéticos** la susceptibilidad es positiva, **M y H tienen igual sentido.**

En **materiales diamagnéticos** la susceptibilidad es negativa, **M y H tienen distinto sentido.**

En los **superconductores** la susceptibilidad es -1, lo que implica que el **campo B es 0 (nulo).**

Curva de magnetización

Si a una bobina con núcleo de hierro se le aplica una corriente I, esta generará en su núcleo una intensidad de campo H, que se verá aumentado por la magnetización del material, obteniéndose un campo total B. Si graficamos $B = f(H)$ veremos:

- Al aumentar H aumentará B (línea roja). Si H se hace muy grande (**punto 1**), **el núcleo se satura** (la imantación llega al máximo), el material no aporta campo. A partir de dicho punto, B tiende a permanecer casi constante.
- Si se comienza a disminuir la I, H disminuye y lo hace por la línea 1-2. Si, en el **punto 2** anulamos la I ($I=0$), **el material queda magnetizado.**
- Si ahora cambiamos el sentido de la I (damos vuelta la fem), el núcleo comenzará a desimantarse (línea 2-3), llegando a hacerse **B=0, en el punto 3** (existiendo I).
- Si se sigue aumentando la I (en sentido negativo), el núcleo se imantará, en sentido opuesto, hasta el **punto 4 (saturación).**
- Si ahora empezamos a disminuir la I (en valor absoluto) y cuando se anula damos vuelta nuevamente la fem y comenzamos a aumentar I (en sentido positivo de H), llegaremos nuevamente al punto 1 (saturación).

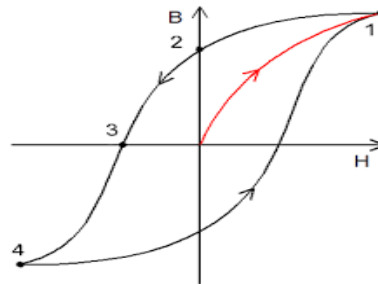
La superficie generada en el proceso se llama " **ciclo de histéresis**" (retraso). Las microcorrientes de imantación no son capaces de cambiar de sentido tal como lo hace (en el mismo instante) la intensidad H.

La superficie del ciclo, representa, en las máquinas eléctricas sometidas a una corriente variable, pérdidas de energía, llamadas **pérdidas por histéresis**. El calor producido por unidad de volumen de material es igual al área del ciclo de histéresis.

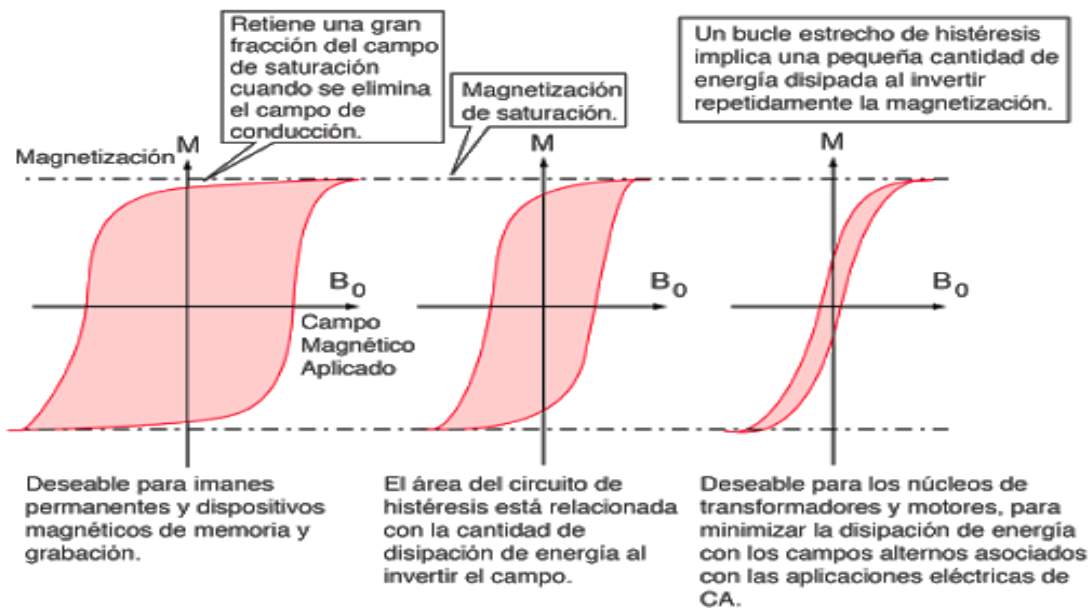
En materiales para las máquinas eléctricas se procurará que el ciclo sea lo más estrecho posible. En cambio, si se pretende guardar información en forma magnética, o elaborar imanes artificiales, el ciclo debe ser ancho.

Las pérdidas por histéresis se evalúan, en las chapas laminadas para núcleos de bobinas para máquinas eléctricas, mediante la **fórmula de Steinmetz** en Watt por kilogramo de chapa.

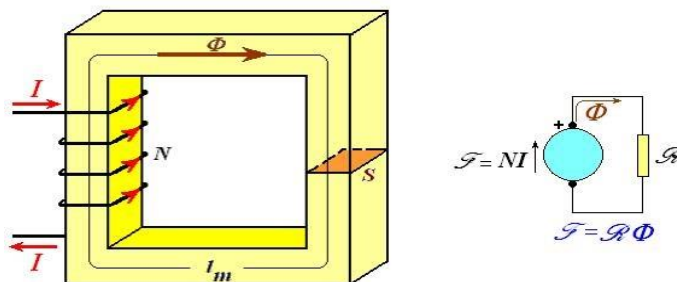
$W/Kg = 1,3 \cdot 10^{-8} F B^{1,6}$ donde F es la frecuencia de la I, B el campo magnético y $1,3 \cdot 10^{-8}$ es el coeficiente para chapas laminadas de hierro de 0,35 mm de espesor con 3% silicio.



Actualmente los imanes se producen de ésta manera, es decir, al anular la I en el punto 2, el material queda magnetizado (es un imán artificial). Anexo la siguiente imagen explicativa, donde se reemplaza el B por la M (magnetización), que es lo que aporta el material.



Circuitos magnéticos



En la imagen vemos un circuito de flujo magnético generado por una fuerza magnetomotriz (Amp vuelta) que debe circular por la longitud del núcleo (l_m) a través de la sección del

mismo. Las variables, longitud, sección y permeabilidad son las que definen la reluctancia (\mathcal{R}), equivalente a la resistencia eléctrica (R). Siendo la $\mathcal{R} = \text{long.} / \mu \text{ Sección}$

CIRCUITO ELÉCTRICO	CIRCUITO MAGNÉTICO
E: Fuerza electromotriz [V]	F_{mm} : Fuerza magnetomotriz [A]
I: Intensidad de corriente [A]	Φ : Flujo magnético [Wb]
R: Resistencia óhmica [Ω]	\mathcal{R} : Reluctancia [1/H]
$\sum I = 0$	$\sum \Phi = 0$

Desde el punto de vista de la electrostática, las analogías se cumplen entre las siguientes variables:

El campo eléctrico E (vector) es análogo a la intensidad magnética H (vector).

El vector desplazamiento D es análogo al vector campo magnético B .

La conductividad eléctrica σ es análoga a la permeabilidad magnética μ .

La susceptibilidad eléctrica χ es análoga a la susceptibilidad magnética χ .

La inversa de la conductibilidad ($1/\sigma =$ resistividad) es análoga a la inversa de la permeabilidad ($1/\mu$).