

# MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO :

- Apunte en base al libro:
- “ELECTROTECNIA”
- de Pablo Alcalde San Miguel
- Autor: **SUPPICICH, Mario Luis. OLSSON, Jorge Alberto.**
- **EPET N° 3 “POLONIA” OBERÁ - 2021**

**BREVE NOTA INTRODUCTORIA**

**Estos fenómenos físicos son temas que constituyen el sustento técnico sobre el cual se desarrollan los principios de funcionamiento de las máquinas y componentes eléctricos más difundidos, tanto en la industria como en la vida diaria. Así, de la aplicación de los conceptos de Magnetismo y Electromagnetismo surgen, entre muchas otras aplicaciones, la de motores eléctricos, las instalaciones eléctricas, los generadores y transformadores, alternadores, electroválvulas, contactores, electroimanes, hornos de inducción, relés, altavoces o parlantes, detectores de metales, etc.**

## MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO: Definiciones y conceptos iniciales

**MAGNETISMO:** parte de la física que estudia y se relaciona con los fenómenos de atracción y repulsión que se dan en los **imanes y materiales ferromagnéticos**.-

**ELECTROMAGNETISMO:** parte de la física que estudia y se relaciona con los fenómenos magnéticos (atracción y repulsión) que se manifiestan cuando **la corriente eléctrica circula por conductores y bobinas**.-

**MATERIALES FERROMAGNÉTICOS:** se denomina así al conjunto de materiales los cuales son susceptibles de ser “atraídos” , con cierta fuerza, por los imanes; ejemplos de estos materiales son: hierro, acero, cobalto, níquel, etc. .-

### ZONAS DE UN IMÁN:

Las zonas donde se produce la mayor atracción de un imán se denominan “**Polos Magnéticos**”. La zona donde no se producen fenómenos de atracción se denomina “**Zona Neutra**”.-

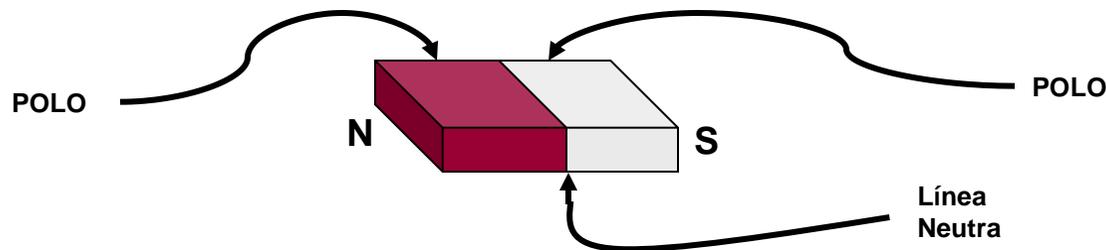
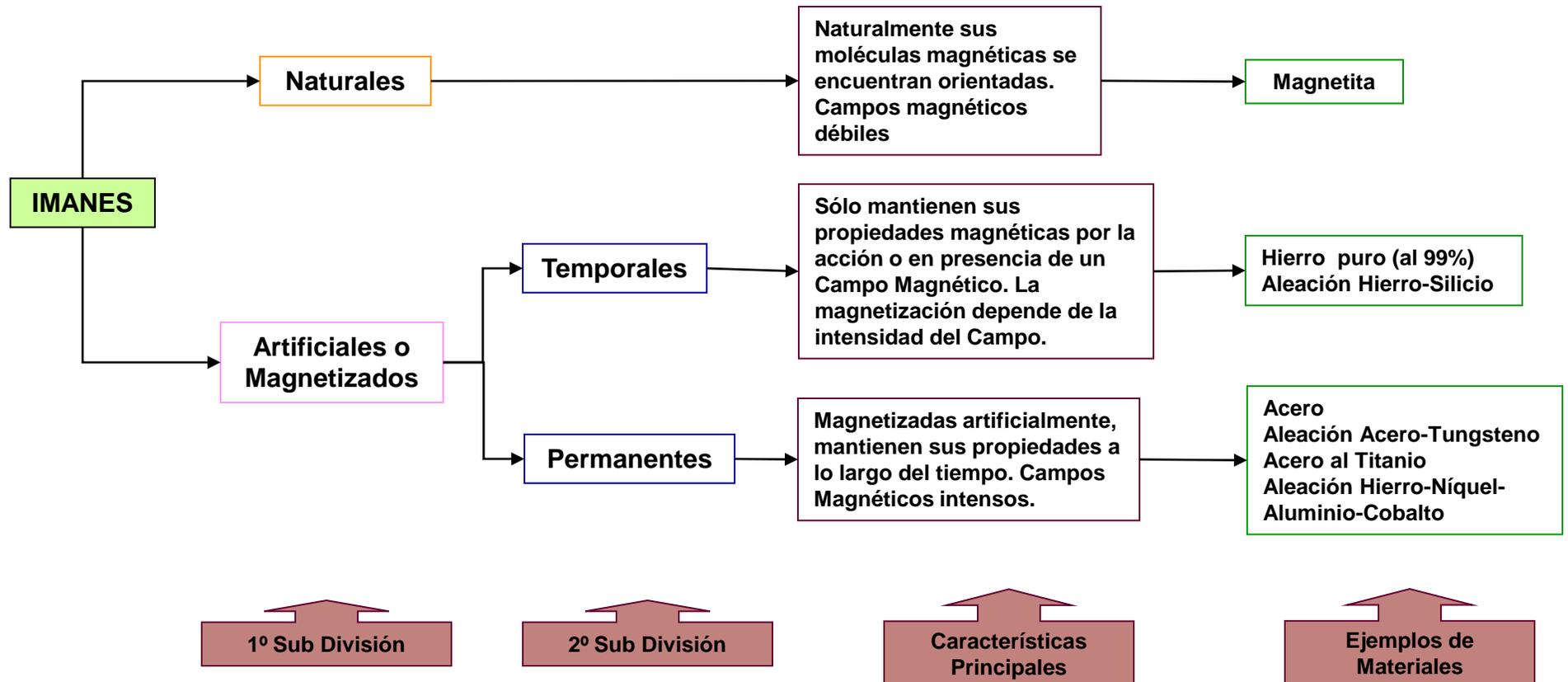


Figura N° 1

La Naturaleza y principalmente la Tecnología, nos permiten contar con diferentes materiales que presentan propiedades magnéticas visibles; a continuación, y a modo informativo, damos una clasificación básica de los diferentes tipos de imanes existentes:



## MAGNETISMO: Teoría molecular de los imanes - Clasificación de los Imanes

### Teoría Molecular de los Imanes.-

Si dividimos un imán en varias partes (ver figura N° 2) comprobaremos que cada una de esas partes nuevamente se comporta como un imán completo; esto es con sus dos polos y su línea neutra; Si subdividimos cada una de las partes obtenidas en la primer división del imán original, obtendremos partes más pequeñas aún pero que igualmente se conforman como imanes. Repitiendo este proceso multitud de veces hasta lograr obtener imanes infinitesimales, alcanzaremos lo que en física se denomina "Molécula Magnética". De acuerdo con esto, podemos deducir que un imán real está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas en acuerdo con los polos respectivos del imán (ver figura N° 3).

Como referencia de comparación, en la figura N° 4 representamos un trozo de hierro sin imantar en el cual se aprecia el conjunto de moléculas magnéticas del mismo pero totalmente desorientadas;

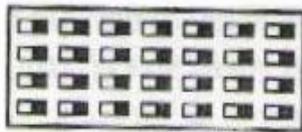
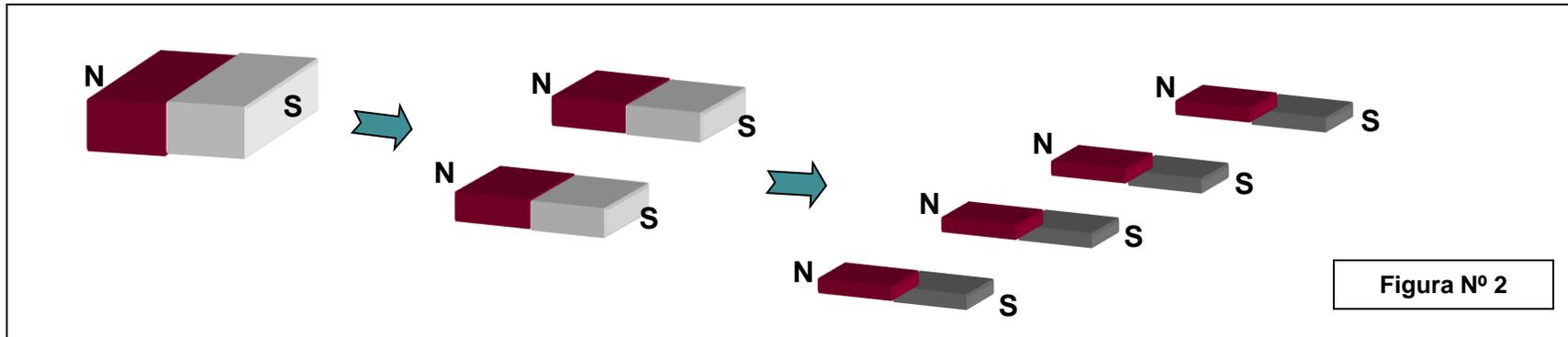
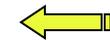


Figura N° 3



Figura N° 4

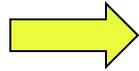


Una porción de imán ordenado molecularmente (**Figura N° 3**) y un trozo de hierro y su desorden molecular (**Figura N° 4**)

## MAGNETISMO: Campo Magnético de Imanes - Líneas de Fuerza

**CAMPO MAGNETICO DE IMANES:** definimos como “Campo Magnético de Imanes” a la zona del espacio próximo a un imán en el cual se manifiestan y evidencian fenómenos magnéticos.-

CARACTERÍSTICAS  
DEL CAMPO  
MAGNÉTICO DE  
ÍMANES



- Es más intenso en algunas partes que otras.-
- Adquiere su máxima intensidad alrededor y en las cercanías de los polos magnéticos del imán.-
- Disminuye paulatinamente a medida que aumenta la distancia respecto de los polos magnéticos.-

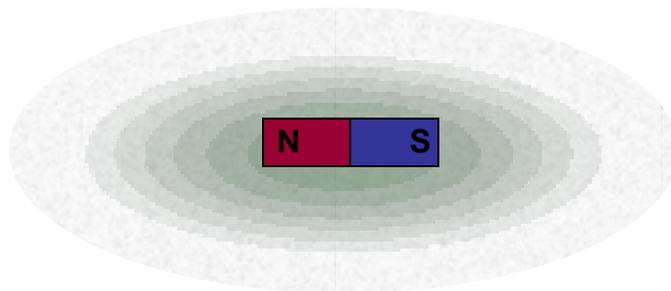


Figura Nº 5

La Figura Nº 5 es la representación en el plano de el campo magnético alrededor de un imán el cual se pone en evidencia mediante la experiencia de las “limaduras de hierro” sobre una lámina transparente. Obsérvese que es mayor la concentración de limaduras en las cercanías de los polos, disminuyendo a medida que aumenta la distancia respecto de estos últimos.

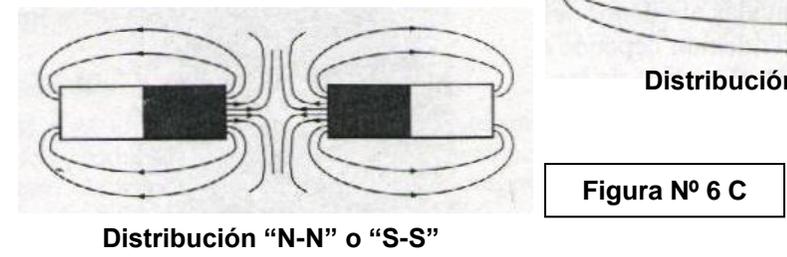
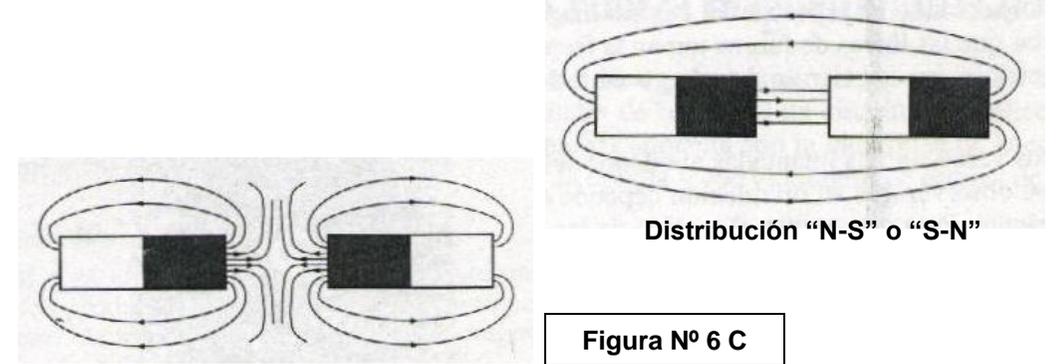
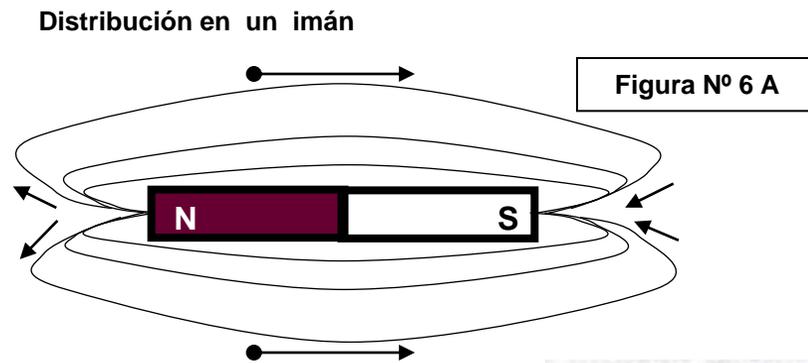
(Continuación) MAGNETISMO: Campo Magnético de Imanes - Líneas de Fuerza

La observación de la experiencia del imán y las limaduras de hierro, además de la concentración espacial de las limaduras, nos permite apreciar que tal concentración no se da de cualquier manera sino que las limaduras se agrupan formando unas líneas que van de un polo a otro del imán; estas “líneas de limadura se conocen como “Líneas de Fuerza del Campo Magnético”. A continuación damos algunas características obtenidas de análisis y ensayos, que presentan las “Líneas de Fuerza” de los campos magnéticos generados por imanes.

Características de las Líneas de Fuerza de un Campo Magnético

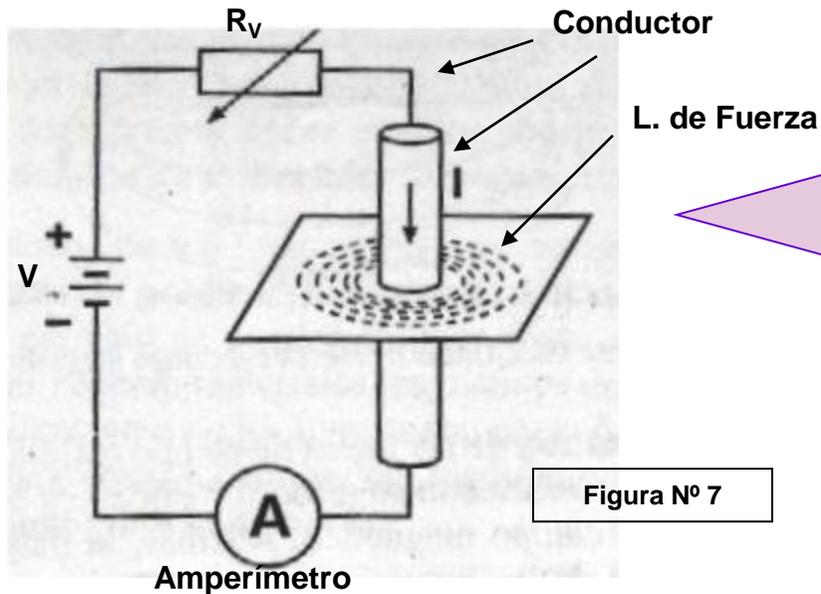
- Representan la “forma” del Campo Magnético.-
- Convenciones teóricas les asignan un sentido de circulación de manera tal que: salen del polo Norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo Sur; internamente al imán circulan de Sur a Norte.-
- La visualización de las “L. de F.” permite conocer la orientación del Campo Magnético.-
- La mayor o menor concentración de las mismas en el espacio alrededor del imán permite conocer la intensidad del Campo Magnético.-

Distribuciones Características de las L. de F.



## ELECTROMAGNETISMO: Campo Magnético generado por una Corriente Eléctrica

Los imanes, si bien pueden producir campos magnéticos intensos, éstos campos no resultan suficientes para ciertas aplicaciones tecnológicas fundamentalmente cuando involucra tamaños y costos; para superar esta limitación se aplica otro fenómeno físico que sustenta en la observación de que cuando circula a través de un conductor una corriente eléctrica, en el espacio circundante se manifiesta la presencia de un Campo Magnético. En lugar de un conductor rectilíneo, en las aplicaciones técnicas se utiliza un conductor “arrollado” en una cierta cantidad de vueltas. Estas vueltas se denominan “Espiras” y el arrollamiento completo conforma lo que se conoce como “Bobina o Solenide”; además se comprueba que la intensidad del Campo producido depende de la Intensidad de la Corriente ( $I$ ) circulante y de la cantidad de espiras (o vueltas) que componen la bobina. Veamos pues los principios básicos en que se sustentan estos conceptos.-



Un conductor es atravesado por una corriente de intensidad “ $I$ ”. Si se repite la experiencia de las “limaduras de hierro”, podremos observar que estas **se orientan** formando un **espectro circular concéntrico** con el conductor sobre la lámina transparente; tal como indica la figura N° 7

Se demuestra que el sentido de las Líneas de Fuerza del Campo Magnético generado alrededor del conductor dependen del sentido de circulación de la corriente eléctrica en el mismo.

El sentido de estas Líneas de Fuerza se obtiene aplicando la “Regla de Maxwell” o también conocida como “Regla del Tirabuzón”

**LA REGLA DEL “TIRABUZÓN”**

“El sentido de las Líneas de Fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicaría el giro de un tirabuzón que avanzase en el mismo sentido que la Corriente Eléctrica”.-

Conductor Rectilíneo

Sentido de giro del Tirabuzón



Figura N° 8

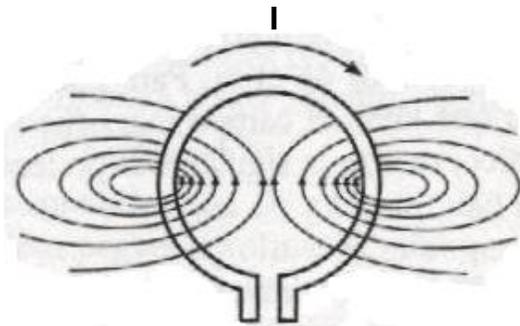


Figura N° 9

Un conductor recto produce un Campo muy disperso y débil; la forma de conseguir Campos más concentrados y fuertes es disponiendo el conductor en forma de anillo o “espira” (ver Figura N° 9). Podemos apreciar que el sentido de las L. de F. de una parte del conductor se suman a las de la otra parte, resultando una mayor concentración de las Líneas en la parte interna de la espira y por lo tanto un Campo Magnético más intenso en esta zona ; nuevamente, esto se verifica con la experiencia de las “limaduras de hierro”.

(Continuación)

## ELECTROMAGNETISMO: Campo Magnético generado por una Bobina o Solenoide

Las bobinas o solenoides, generan fenómenos magnéticos basados en el campo generado por una espira circular.

Puesto que la bobina no es otra cosa que un conductor originalmente recto que es enrollado formando una cierta cantidad de espiras, una junto a la otra, de manera que el campo magnético parcial de cada espira de la bobina sea aditivo; se obtiene así un campo magnético total de mayor valor, en intensidad y densidad, en el interior de la bobina. Veamos las características magnéticas de una bobina.....

### REGLA DEL TIRABUZÓN PARA UNA BOBINA

Se gira el "tirabuzón" en el mismo sentido en que circula la corriente eléctrica por las espiras de la bobina; luego, el avance del tirabuzón nos indica el sentido de las Líneas de Fuerza. Sabiendo el sentido de éstas, es fácil determinar los polos de la bobina. (ver Figura N° 10)

Campo y Flujo Magnético en una bobina.-

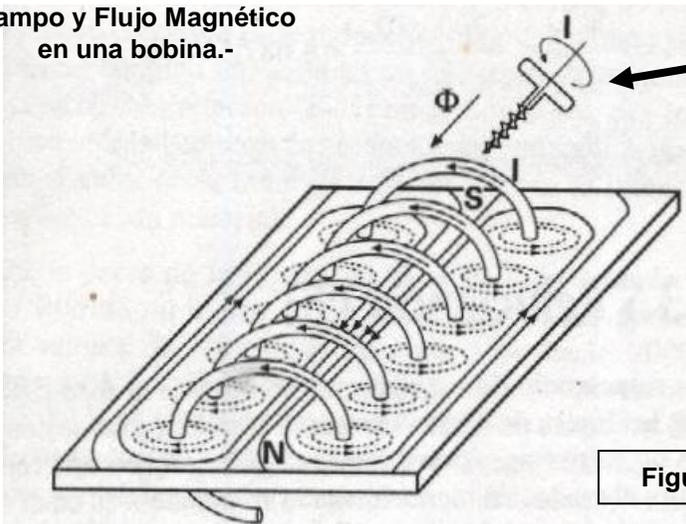


Figura N° 10

El campo magnético es uniforme y mucho más intenso en el centro de la bobina que en su espacio exterior circundante (mayor dispersión del flujo). En los extremos de la bobina se forman los Polos Magnéticos de la misma, tal como indica la Figura N° 10.

Por el conductor que forma la bobina, circula una corriente de intensidad " I " (amperes) y la bobina posee " N " espiras o vueltas.-

En las explicaciones anteriores hemos mencionado una serie de conceptos y términos vinculados a los fenómenos y características magnéticas y electromagnéticas. Definiremos a continuación las variables asociadas a los fenómenos físicos de origen magnético y estableceremos los modelos matemáticos ( sus tan queridas y reclamadas “formulitas”) que nos permiten el cálculo de estas magnitudes y, obviamente, el diseño posterior de aquellos componentes que basan su funcionamiento en estos conceptos (motores, electroimanes, contactores, generadores, transformadores, etc.).-

### FLUJO MAGNÉTICO ( $\Phi$ ).-

Como ya hemos explicado, el Campo Magnético se representa por medio de Líneas de Fuerza.

Por lo tanto podemos definir como:

***El Flujo Magnético ( $\Phi$ ), está constituido por el conjunto de Líneas de Fuerza que se manifiestan o atraviesan una parte o zona del espacio donde se observan fenómenos magnéticos.-***

#### **Unidades del Flujo Magnético.-**

Sistema Internacional: el [ Weber ] = [ Wb ]

Sistema C.G.S.: el [ Maxwell ] = [ Mx ]

Equivalencia: **1 Wb =  $10^8$  Mx**

### INDUCCIÓN MAGNÉTICA (B).-

Definimos a la Inducción Magnética (B) como:

***El número o cantidad de Líneas de Fuerza que atraviesan perpendicularmente una superficie unitaria (unidad de superficie).***

De acuerdo con esta definición, podemos expresar que la Inducción Magnética nos representa en cierta forma lo “densas” que son las Líneas de Fuerza en una parte del Campo Magnético o bien la densidad del Flujo Magnético por unidad de superficie.

#### **Unidades del Flujo Magnético.-**

Sistema Internacional: el [ Tesla ] = [ T ]

Sistema C.G.S.: el [ Gauss ] = [ Gs ]

Equivalencia: **1 T =  $10^4$  Gs**

De acuerdo con la definición, la Inducción Magnética (B) se obtiene mediante la expresión matemática:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Se dice que existe una Inducción (B) de 1 Tesla, cuando un Flujo ( $\Phi$ ) de 1 Wb atraviesa una superficie (S) de  $1 \text{ m}^2$ .

**FUERZA MAGNETOMOTRIZ (  $\mathcal{F}$  ).-**

Es una magnitud fundamental de las bobinas y se la define como:

***La Fuerza Magnetomotriz (  $\mathcal{F}$  o Fmm) es la capacidad que posee una bobina para generar Líneas de Fuerza en un Circuito Magnético.-***

La Fmm es directamente proporcional a la **intensidad de la corriente eléctrica** (I) que circula por la bobina **y a la cantidad o número de vueltas (espiras)** (N) que la misma posee.-

**Expresión Matemática y Unidades de la Fmm (  $\mathcal{F}$  ).-**

$$\mathcal{F} = N \cdot I = [\text{Amp}] \cdot [\text{vueltas}] \Rightarrow \mathcal{F} = [\text{Amper-vuelta}]$$

En esta expresión es:

$\mathcal{F}$  = Fuerza Magnetomotriz en (Amperes-vuelta)    **N** = Número de espiras o vueltas    **I** = Intensidad de la corriente circulante

**INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO (H).-**

Tal como su nombre lo indica, la Intensidad de Campo Magnético podríamos definirla como:

***La magnitud cuyo valor nos indica lo intenso que es el Campo Magnético generado por una bobina.-***

Observemos que la definición de “H” nos permite deducir una relación directa entre la Fuerza Magnetomotriz ( $\mathcal{F}$ ) y la Intensidad de Campo; ahora bien, si recordamos que la expresión matemática de la Fmm involucra también a la cantidad de espiras (N) de la bobina y además, cuanto más espiras posea ésta, tanto más longitud tendrán las Líneas de Fuerza generadas; y por lo tanto más débil será esta Intensidad de Campo “H”, debido a la dispersión de dichas Líneas. Podemos concluir del análisis anterior que:

La Intensidad de Campo Magnético “H” es directamente proporcional a la **Fuerza Magnetomotriz** (Fmm) e inversamente proporcional a la **longitud media** de las Líneas del Campo Magnético. En consecuencia, el modelo matemático para el cálculo de “H” estará dado de la siguiente forma:

En la cual es:

**H** = Intensidad de Campo en (Av./ m)

**N** = Número de vueltas de la bobina

**I** = Intensidad de la corriente eléctrica circulante (A)

**L** = Longitud media de las Líneas del Campo (m)

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

**RELUCTANCIA ( $R$ ).**

El concepto de Reluctancia ( $R$ ), está asociado a las características propias de los materiales; de tal modo que se la define como: *El grado de dificultad que manifiesta un material para establecer Líneas de Fuerza en un Campo Magnético.*

Si analizamos la definición de esta magnitud magnética, podemos deducir que el concepto de Reluctancia en los Circuitos Magnéticos es análogo al concepto de Resistencia, en los Circuitos Eléctricos.

Por ejemplo: los materiales que no son ferromagnéticos, tal como el aire, madera o aluminio; presentan una Reluctancia ( $R$ ) mucho mayor que los materiales ferromagnéticos como el acero y algunas de sus aleaciones o bien la aleación hierro-silicio. Las experiencias demuestran que la Reluctancia de un circuito magnético está dada por la siguiente expresión matemática:

$$R = \mathcal{F} / \Phi = N.I / \Phi \quad (a)$$

Consecuentemente, la unidad de Reluctancia en el Sistema Internacional, será:

$$R = [A.v] / [Wb]$$

**LEY DE HOPKINSON**

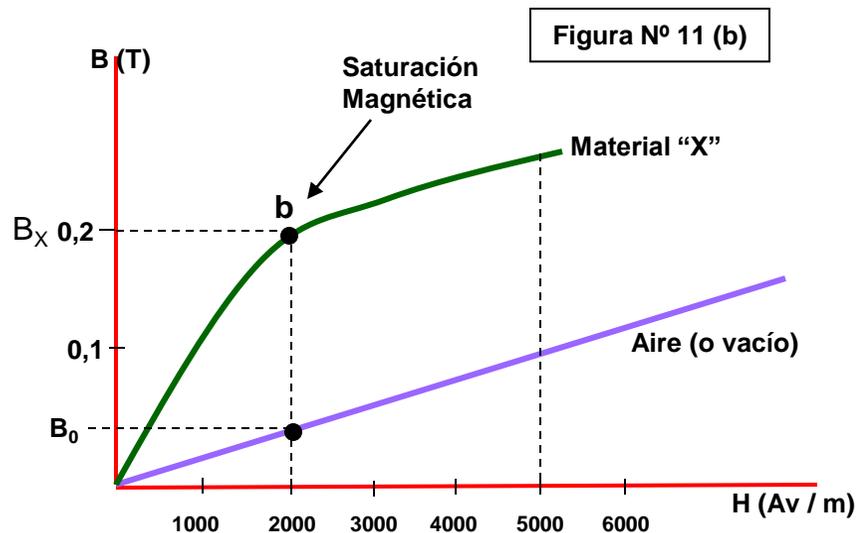
Puesto que indicamos que la Reluctancia era un concepto análogo al de Resistencia; existe también aquí una Ley similar a la Ley de Ohm de la corriente eléctrica; esta ley física se la conoce como "**Ley de Hopkinson de los Circuitos Magnéticos**". En realidad, la Ley de Hopkinson es la que define a la Reluctancia y su expresión matemática resulta de reordenar la ecuación (a) anterior, es decir:

$$\Phi = \mathcal{F} / R \quad (b)$$

Podemos comparar la expresión (b) con la Ley de Ohm resultando las relaciones análogas siguientes:

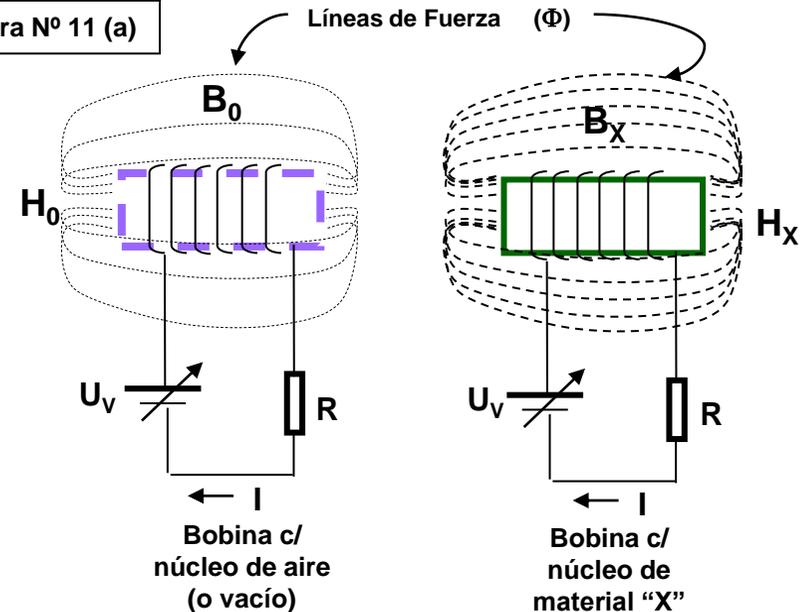
El Flujo análogo con la Intensidad de la Corriente Eléctrica - La Fmm es análoga de la Fem y obviamente, la Reluctancia resulta análoga de la Resistencia (inclusive ambas dependen del tipo de material, como recordarás de la definición de Resistencia).-

Cuando se somete una sustancia o material a la acción de un campo magnético cuya Intensidad de Campo “H (en Av/ m)” creciente; la Inducción Magnética “B (en T) que aparece en dicho material también es creciente (aumenta) en una relación determinada. En la mayoría de los materiales, esta relación [B = f (H)] no es constante y es particularmente característica de cada material. Esta relación (función), representada gráficamente en un sistema de ejes cartesianos resulta en una curva denominada “Curva de Magnetización del Material”; veamos como se obtiene y sus características fundamentales....



$$H_x = H_0 = 2.000 \text{ Av/m} \quad B_x = 0,2\text{T} > B_0 = 0,1\text{T}$$

Figura N° 11 (a)



La Figura N° 11 (a) representa esquemáticamente el circuito utilizado para obtener las curvas de magnetización de una bobina cuando su núcleo es de aire (o vacío) en el primer caso y en el segundo cuando se le coloca un material “X” (ferromagnético generalmente).

Por el circuito circula una corriente eléctrica de intensidad “I”, obtenida mediante una fuente de tensión variable “ $U_v$ ” y se ha colocado también una resistencia de carga “R”.

Puesto que el número de vueltas (N) de la bobina y su longitud (L) se mantienen constantes, la Intensidad de Campo Magnético (H) se puede modificar cambiando el valor de la intensidad de corriente (I) mediante la regulación de la tensión aplicada a la bobina por la fuente de alimentación ( $U_v$ ); de esta manera, al variar la intensidad de campo (H) podemos registrar los respectivos valores que adquiere la inducción magnética (B) tanto para el caso de núcleo de aire como para el núcleo con el material “X”.-

La figura N° 11 (b) reproduce las curvas obtenidas del ensayo para ambos casos; a continuación describimos dicha gráfica.-

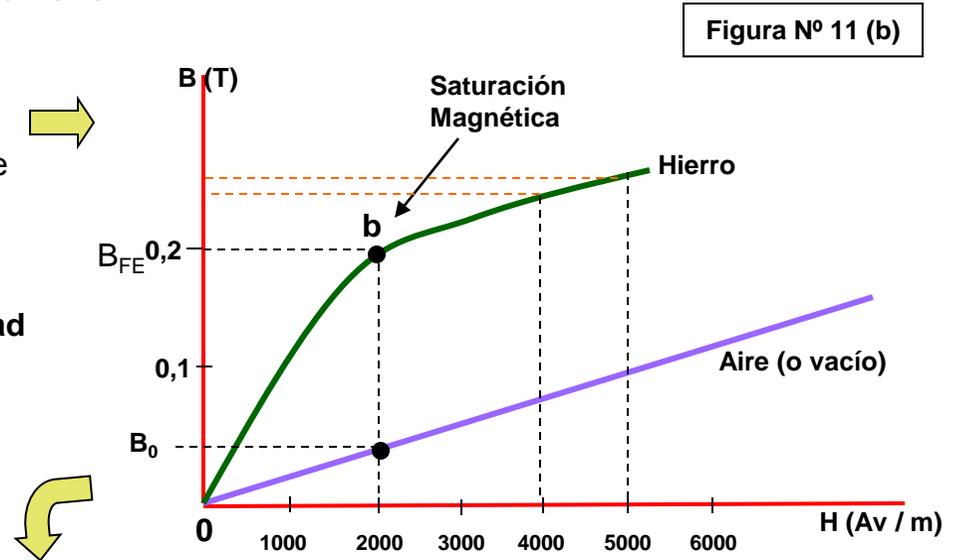
Retomemos la Figura N° 11 (b), indicada en la hoja anterior:

En este caso y para la descripción, suponemos que el material que llamamos "X" es **Hierro Dulce**.

En la gráfica se puede apreciar que para valores de "H" de hasta **2.000 Av/m (tramo 0-b)**, la inducción **B** crece casi proporcionalmente hasta el valor de **0,2 T (punto b)**.

A partir de aquí, aparece un punto de inflexión (b) en la curva de manera tal que **aunque se aumente la intensidad "H" en valores grandes, la inducción "B" sufre aumentos muy pequeños**.

Cuando se llega a esta situación se dice que el material (hierro dulce en este caso) ha alcanzado la "Saturación Magnética".



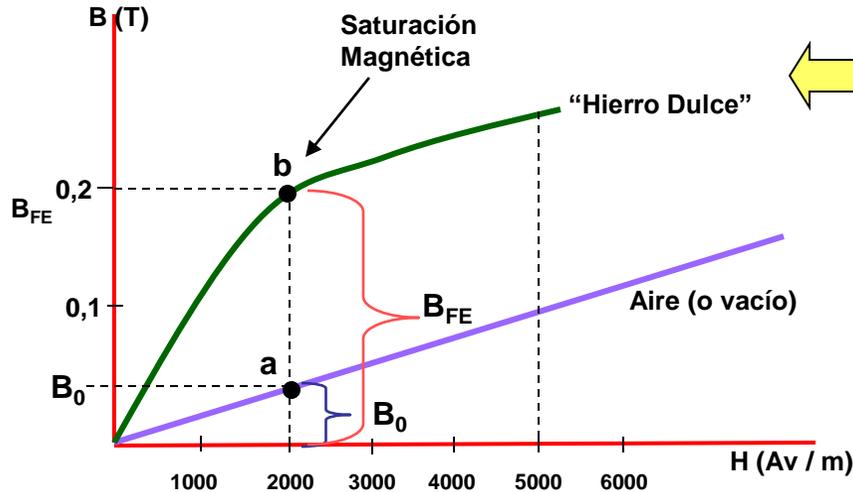
La explicación de este fenómeno tiene su fundamento en la "Teoría Molecular de los Imanes" descrita anteriormente; en efecto: Cuando se introduce en una bobina **un núcleo de algún material ferromagnético** y se hace circular **una corriente eléctrica por la bobina**, aparece un campo magnético en su interior de intensidad de campo "H", el cual **orienta** en cierto grado las moléculas magnéticas del material; por lo tanto se "refuerza la inducción "B del campo magnético.

A medida que se aumenta "H", las moléculas se orientan cada vez más; esto se traduce en un nuevo y paulatino crecimiento de la inducción "B". Si seguimos aumentando "H" (mediante el aumento de la intensidad "I") llegaremos a **la situación en que las moléculas magnéticas del material se encuentran totalmente orientadas**; a partir de este punto, por mucho que se aumente "H" ya no percibiremos un aumento importante de la inducción "B"; tal como lo representa la curva respectiva de la Figura N° 11 (b). **Decimos entonces que se ha alcanzado la "Saturación Magnética" del material.**

Si en la misma figura comparamos con la representación gráfica obtenida para la bobina con núcleo de aire (o vacío) la cual está representada por una línea recta, podemos deducir que en este caso existe un crecimiento pequeño pero constante de la inducción "B" a medida que aumentamos la intensidad de campo "H"; inclusive podemos observar que este crecimiento es directamente proporcional y lineal sin alcanzarse en ningún caso el estado de "Saturación Magnética".

Volvamos nuevamente a examinar las Curvas de Saturación Magnética indicadas en la Figura Nº 11(b) .....

Figura Nº 11 (b)



En la explicación anterior, pudimos comprobar que al introducir un núcleo de material ferromagnético en una bobina, se produce un aumento importante de sus propiedades magnéticas que se traduce en un aumento de las Líneas de Fuerza del campo magnético.

Observemos nuevamente la Figura Nº 11 (b) : en ella hemos llamado  $B_0$  a la inducción magnética producida por la bobina cuando el núcleo es de aire; y denominamos  $B_{FE}$  al valor de inducción conseguido con el núcleo de Hierro Dulce (ferromagnético).

Si comparamos los segmentos representativos de cada uno de estos valores, podemos deducir que existe una proporcionalidad entre ellos tal que

$$B_{FE} / B_0 = n \quad (\text{donde } n \in \mathbb{R})$$

si tomamos el valor de  $B_0$  como referencia obtendremos:

$$B_{FE} = n \cdot B_0 \quad (1)$$

La expresión (1) inferimos que el número “n” ejerce un efecto multiplicador sobre el valor de  $B_0$  cuando en la bobina se coloca un material ferromagnético.

Este parámetro recibe el nombre de : “**Permeabilidad Relativa**”, se indica mediante la letra griega “mhu” ( $\mu_R$ ) donde el subíndice “R” indica que se trata de la Permeabilidad Relativa del material ferromagnético respecto del aire o del vacío.

la Permeabilidad Relativa nos indica la capacidad que tiene un material de multiplicar las Líneas de Fuerza del campo magnético generado por la bobina; en consecuencia, la expresión matemática (1) nos queda:

$$B_{FE} = \mu_R \cdot B_0 \quad (2)$$

**El valor de la Permeabilidad Relativa** es característico de cada material; aún de aquellos clasificados como ferromagnéticos; aunque en estos últimos la diferencia entre sus valores no es muy grande, salvo para aquellas aleaciones del acero obtenidas expresamente para su utilización como núcleos magnéticos como es el caso de la aleación de acero-silicio.

Tengamos en cuenta que si cesa la circulación de corriente eléctrica por la bobina, el campo desaparece y con él los efectos magnéticos; por lo tanto el núcleo de la bobina, mientras ella está energizada, constituye lo que denominamos **un Imán temporal**.

Como ya explicamos en hojas anteriores, este efecto multiplicador de la inducción producida por la bobina al introducir un material ferromagnético se explica aplicando la Teoría Molecular de los Imanes; así, el núcleo de aire produce una cierta cantidad de L. de F.; al introducir el núcleo ferromagnético, estas líneas orientan sus moléculas magnéticas y de ésta manera el material se comporta como un imán aumentando así la cantidad de L. de F. y que se traduce en un aumento de la Inducción “B” hasta llegar a la “Saturación Magnética” del núcleo.

(Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Permeabilidad Magnética Relativa - Comparación de Materiales

Comparación de tres materiales ferromagnéticos respecto del aire o vacío.-

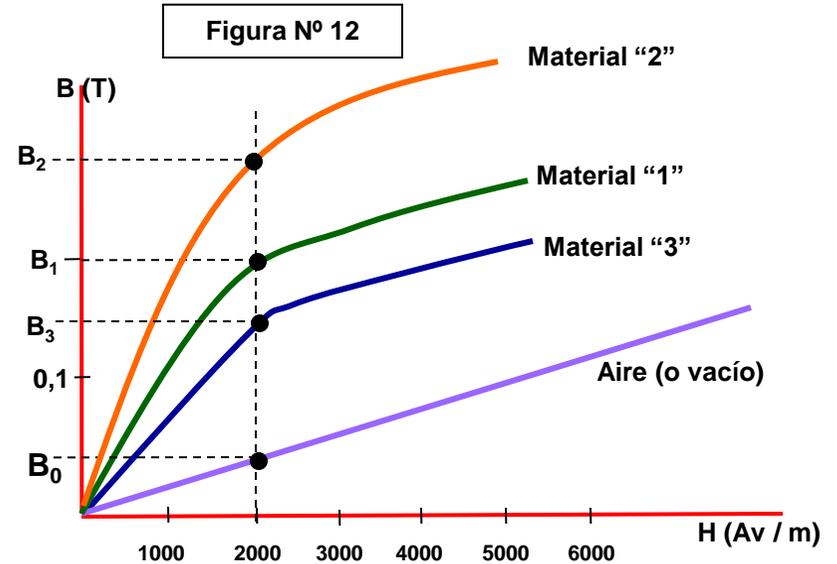


$$B_1 = \mu_{R1} \cdot B_0$$

$$B_2 = \mu_{R2} \cdot B_0$$

$$B_3 = \mu_{R3} \cdot B_0$$

La Permeabilidad Relativa  $\mu_R$  es un número adimensional.-



(Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Permeabilidad Magnética Absoluta y del Aire o Vacío

En la práctica tecnológica es más usual utilizar el concepto de "Permeabilidad Absoluta [ $\mu$ ]"; la cual definimos como: **La relación entre la intensidad de campo ( $H$ ) que produce una bobina y el nivel de inducción magnética ( $B$ ) alcanzado al introducir un material ferromagnético en el núcleo.-**

La unidad de  $\mu$ , en el S.I. es:  $\mu = [\text{Henrios}] / [\text{metro}] = [\text{H} / \text{m}]$

- Cuanto mayor sea el valor de " $\mu$ ", mejores propiedades magnéticas poseerá el material.
- La Permeabilidad Absoluta de los materiales **no es constante y depende de los niveles de inducción a que se los someta**.-

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu \cdot H$$

La Permeabilidad Relativa ( $\mu_R$ ) y la Permeabilidad Absoluta ( $\mu$ ) están relacionadas mediante la "Permeabilidad del Aire o del Vacío" ( $\mu_0$ ), cuyo valor en el S.I. es:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mu_R = \frac{\mu}{\mu_0} \Rightarrow \mu = \mu_0 \cdot \mu_R$$

(Continuación)

**ELECTROMAGNETISMO:**

**Valores de Permeabilidad de Diferentes Materiales**

La tabla siguiente presenta algunos valores de la inducción “B” en función de la intensidad de campo “H” para tres tipos diferentes de materiales ferromagnéticos de uso industrial existentes en el mercado comercial; estos valores se obtienen de ensayos para establecer la curva de magnetización de cada material.-

Realiza un análisis comparativo de los tres tipos de materiales y sus valores característicos

Tabla Nº 1

B (T)	H (Av / m)		
	Hierro Forjado	Chapa Normal	Chapa de Hierro-Silicio
0,1	80	50	90
0,3	120	65	140
0,5	160	100	170
0,7	230	180	240
0,9	400	360	350
1,1	650	675	530
1,3	1.000	1.200	1.300
1,5	2.400	2.200	5.000
1,6	5.300	3.500	9.000
1,7	7.000	6.000	15.500
1,8	11.000	10.000	27.500
1,9	17.000	16.000	-----
2	27.000	32.000	-----

## (Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Ciclo de Histéresis o Remanencia de Materiales Ferromagnéticos

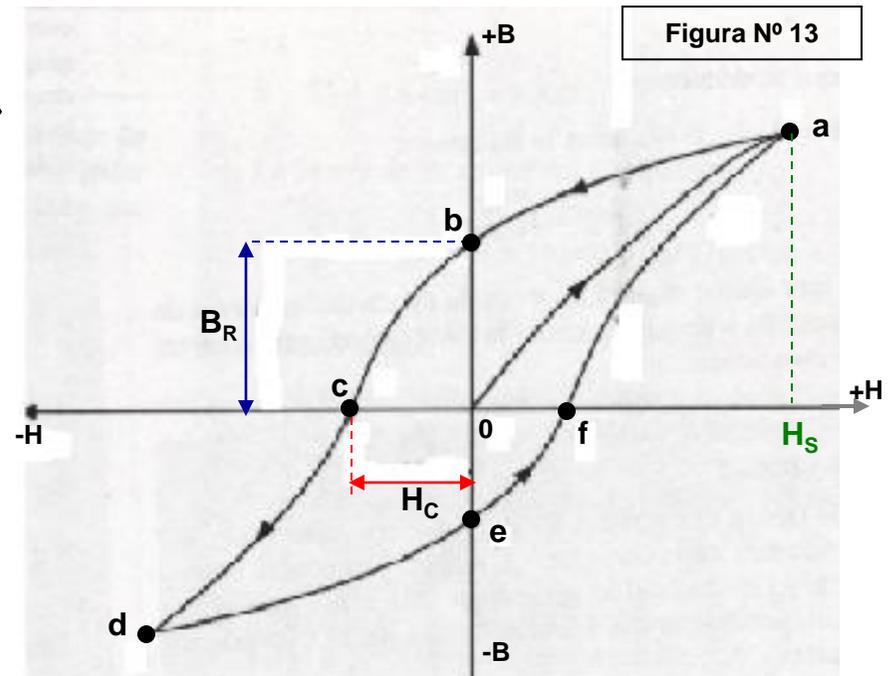
Este título es sumamente importante ya que está ligado directamente al diseño y cálculo de componentes y máquinas eléctricas que utilizan circuitos magnéticos como los descritos hasta aquí; entre otros, podemos mencionar: motores, generadores y transformadores eléctricos.-

El estudio del “Ciclo de Histéresis” de los materiales magnéticos es de gran importancia ya que **éste fenómeno físico produce pérdidas de energía en los núcleos de los bobinados de las máquinas eléctricas cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos alternos**. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen considerablemente el rendimiento de las máquinas y dispositivos electromagnéticos tales como los mencionados en el párrafo anterior. Por otro lado, la palabra “Histéresis” significa “Remanencia”-. En efecto, después de someter un material a la acción de un campo magnético, cuando este desaparece se **observa aún que el material todavía presenta un cierto nivel de inducción “B”**, esta recibe el nombre de “Magnetismo Remanente”.

Para describir el concepto de Histéresis nos apoyaremos en la gráfica de la Figura N° 13, en la cual se representa la “Curva de Magnetización” de un material ferromagnético cuando es sometido a intensidades de campo “H” alternas.

Inicialmente consideramos que el material ferromagnético del ensayo, no ha sido magnetizado nunca y por lo tanto la inducción magnética remanente es nula; de allí que la Curva de Magnetización parte del origen de coordenadas tal como se indica en la Figura N° 13. El sentido de las flechas en la gráfica establecen los sentidos de crecimiento y decrecimiento de la intensidad de campo “H” durante el ensayo.

En la hoja siguiente describimos el proceso y sus características.-



## (Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Ciclo de Histéresis o Remanencia de Materiales Ferromagnéticos

Para una mejor comprensión y seguimiento de la explicación, repetiremos la figura N° 13 anterior....

### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO:

Punto "0": inicio del proceso; el material ferromagnético no posee magnetización remanente.

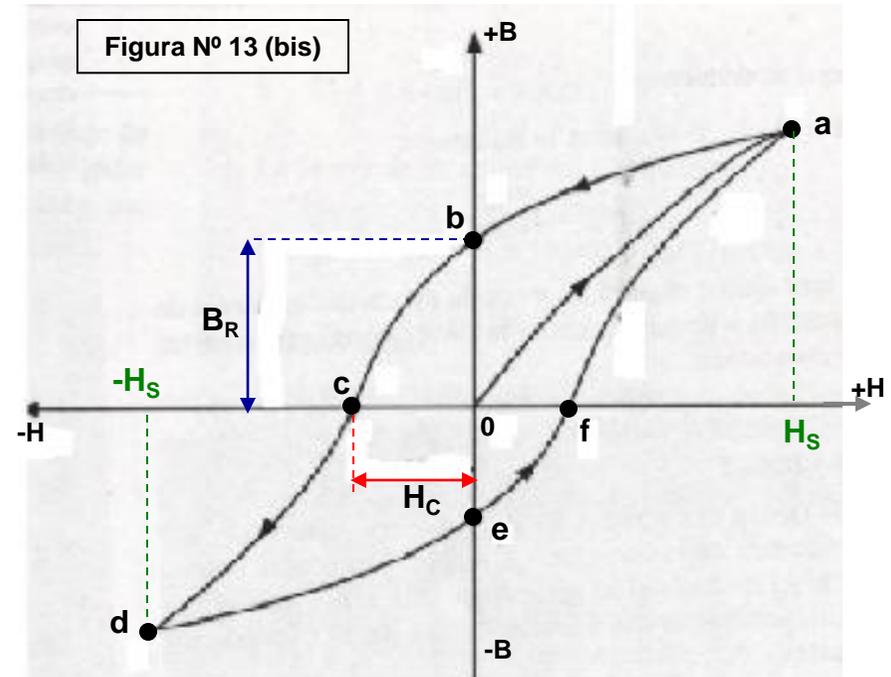
Tramo "0-a": se va aumentando la Intensidad "H" y se obtienen valores crecientes de la Inducción "B" hasta llegar a la Saturación (punto a).-

Tramo "a-b": alcanzada la saturación se reduce la Intensidad "H" pero NO en la misma proporción que antes. En "b" se ha anulado "H" sin embargo el material manifiesta cierta remanencia de valor " $B_R$ ".-

Tramo "b-c": se invierte el sentido del Campo Magnético invirtiendo el sentido de la corriente en la bobina de ensayo. En "c" la Inducción "B" es nula (cero) y por lo tanto se ha eliminado el magnetismo remanente. Para ello fue necesario aplicar una Intensidad de Campo " $H_C$ " conocida como "Campo Coercitivo".-

Tramo "c-d": se continúa aplicando una Intensidad "H" negativa, consiguiendo niveles de inducción "B" negativos hasta alcanzar la saturación (punto d).-

Tramos "d-e", "e-f" y "f-a": se completa el "Ciclo de Histéresis" observando que la curva representativa ya no vuelve a pasar por el punto "0" debido a la Histéresis del material ferromagnético.-



En la hoja siguiente, resumimos algunas conclusiones conceptuales acerca del análisis e interpretación del ensayo descripto; estas conclusiones determinan ciertas consideraciones de diseño en las máquinas eléctricas las cuales, dicho sea, veremos en clases subsiguientes de este año del Trayecto Técnico.-

## (Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Ciclo de Histéresis o Remanencia - Conclusiones

Las pérdidas de energía ocasionadas por el fenómeno de “Histéresis” **son directamente proporcionales al área del ciclo descrito.**-

Estas pérdidas de energía debidas a la Histéresis de los materiales ferromagnéticos también **aumentan con la “Frecuencia” de la Corriente Alterna que produce los campos magnéticos;** (cuantos más ciclos se den por segundo tanto mayor calor se producirá) .-

El **área encerrada por el Ciclo de Histéresis** (área del diagrama) **aumenta** en gran medida **cuando el “Campo Coercitivo ( $H_C$ ) es grande.**-

Cuando se eligen materiales ferromagnéticos para el diseño y construcción de máquinas y componentes **que van a funcionar con Corriente Alterna,** se procura que los mismos **posean un Campo Coercitivo ( $H_C$ ) lo más pequeño posible** (recordar que éstos materiales se comportarán como imanes temporales) .-

Para la fabricación de **imanes permanentes,** al contrario de los imanes temporales, **se requerirán materiales que presenten un Campo Coercitivo lo mas grande posible.**-

Como ya mencionamos, la Histéresis también se puede explicar mediante la “Teoría Molecular de los Imanes”: al someter una porción de material ferromagnético a un Campo Magnético Alterno, las moléculas magnéticas se ven obligadas a “girar” en uno y otro sentido, produciéndose un rozamiento molecular entre ellas con lo cual se genera calor. Esta cantidad de calor generado por el roce molecular es tanto más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición .-

Cuando se llega a la anulación de la Inducción Remanente “ $B_R$ ”, las moléculas magnéticas del material se encuentran todas desordenadas nuevamente; luego, mientras continuamos aumentando negativamente “ $H$ ”, estas comienzan a reordenarse nuevamente pero en sentido contrario; de allí que llegamos a un nivel de saturación negativa en el punto “d” de la gráfica.-

**Circuitos Magnéticos - Definición.-**

Se define un **Circuito Magnético** como **“todo lugar del espacio (aire, vacío o materiales) donde se establecen las Líneas de Fuerza de un Campo Magnético”**.-

Un ejemplo característico de circuito magnético lo constituyen las bobinas. En efecto, admitiendo que poseen núcleos de materiales ferromagnéticos; el núcleo constituye una parte del “Circuito Magnético” y el aire que rodea a la bobina es el otro material que completa o “cierra este circuito magnético (ver Figura 14 a). Como podemos inferir, en este ejemplo el circuito magnético está compuesto por dos materiales diferentes.

De mucha aplicación industrial son los ejemplos de bobinas que conforman un circuito magnético cerrado compuesto de un solo material (ver Figura 14 b) que por lo general es ferromagnético (reactancias o balastos) o bien, el caso de bobinas similares a estas últimas pero que en lugar de tener un núcleo enteramente de material ferromagnético, poseen una muy pequeña longitud o parte del circuito compuesta de aire denominado “Entrehierro” (ver Figura 14 c) y el resto del núcleo es ferromagnético (electroimanes para contactores, de fuerza, relés, electroválvulas, etc.)

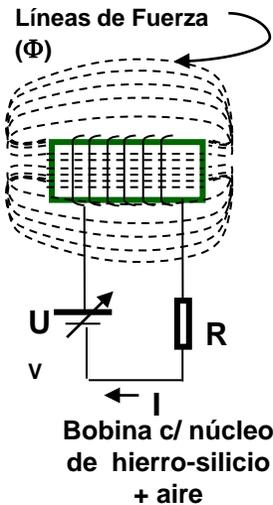


Figura Nº 14 a

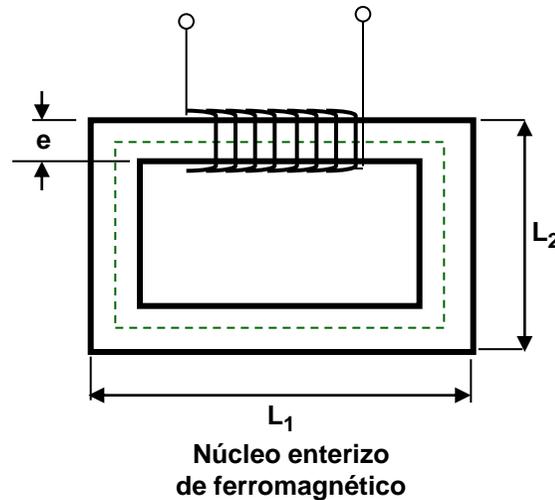


Figura Nº 14 b

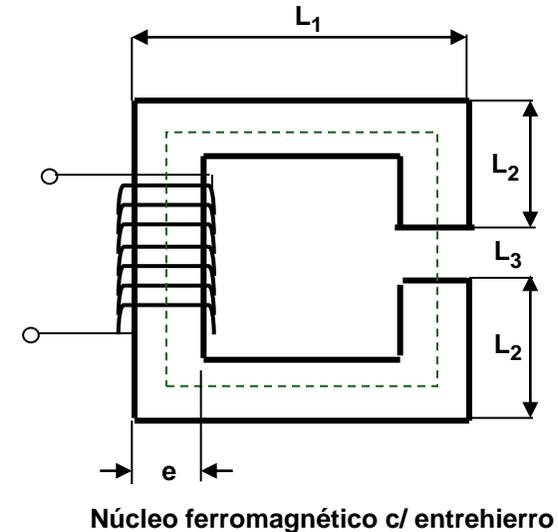


Figura Nº 14 c

(Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Circuitos Magnéticos - Variables y Parámetros de Cálculo

**Los parámetros y variables más importantes vinculados al cálculo de Circuitos Magnéticos son:**

La Fuerza Magnetomotriz ( $\mathcal{F}$ ); la Intensidad de Campo ( $\mathbf{H}$ ); la Intensidad de la Corriente Eléctrica que circula por la bobina ( $\mathbf{I}$ ), La cantidad de espiras o vueltas que la misma posee ( $\mathbf{N}$ ), la Inducción de Campo ( $\mathbf{B}$ ), la Permeabilidad Magnética de el/ los material/es del núcleo ( $\mu$ ) y las curvas y tablas de magnetización.

También reviste particular los parámetros geométricos del núcleo, esto es: longitud media ( $\mathbf{L}$ ), espesor ( $\mathbf{e}$ ), área o sección ( $\mathbf{S}$ ) y las dimensiones máximas exteriores e interiores. Veamos a continuación las expresiones matemáticas que relacionan a este conjunto de elementos

Para determinar la Fuerza Magnetomotriz ( $\mathcal{F}$ ) que debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de Inducción ( $\mathbf{B}$ ), se utilizan las siguientes expresiones:

$$\Rightarrow H = \frac{N \cdot I}{L} \Rightarrow \boxed{N \cdot I = H \cdot L} \quad (1)$$

Ahora bien, recordando que:  $\mathcal{F} = N \cdot I$ ; la ecuación (1) resulta:

$$\boxed{\mathcal{F} = H \cdot L} \quad [\text{Av}] \quad (2)$$

Repasemos, además, los modelos matemáticos que relacionan las variables magnéticas expuestas en las hojas anteriores, a saber:

$$\boxed{B = \frac{\Phi}{S}}$$

Inducción en función del flujo y el área o sección de núcleo

$$\boxed{B = \mu \cdot H}$$

Inducción en función de la Intensidad de Campo y la Permeabilidad

$$\boxed{\mu = \mu_0 \cdot \mu_R}$$

Permeabilidad Absoluta en función de la Permeabilidad del Aire y la Relativa del Material del núcleo

$$\boxed{\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{N \cdot I}{\Phi}}$$

Reluctancia Magnética en función de la Fmm y el Flujo (Ohm Magnético)

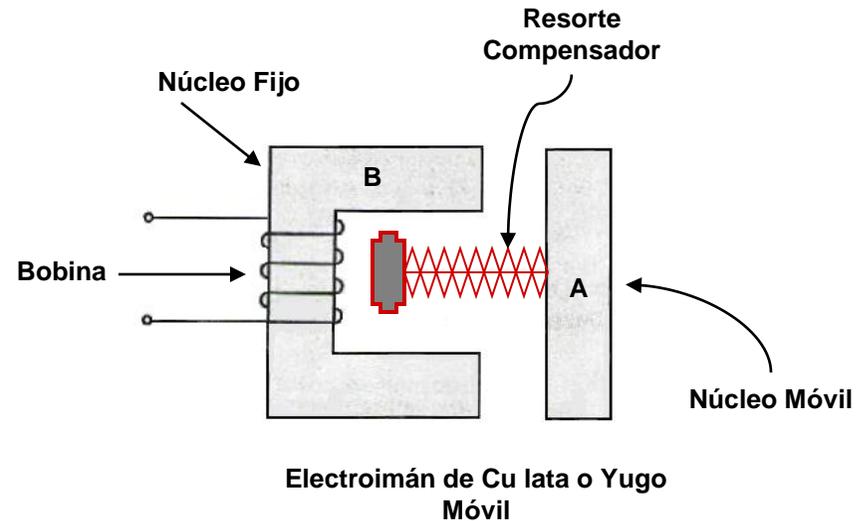
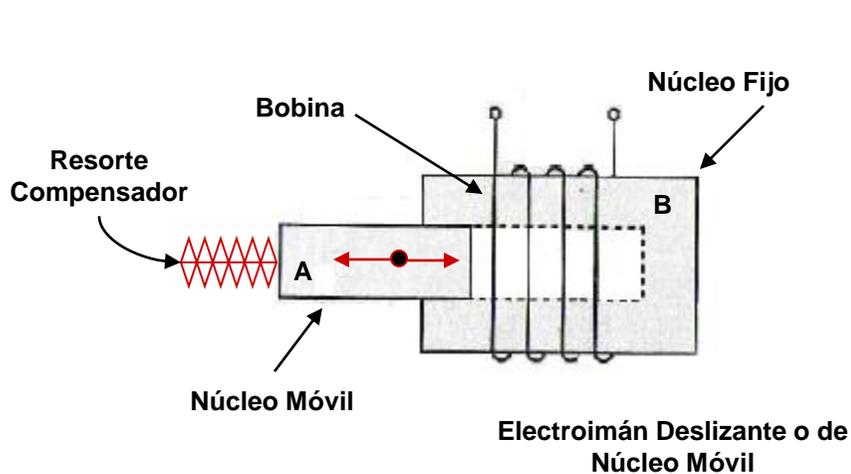
Si el núcleo está formado por un solo material (Figura 14 b) la Fmm se calcula por la ecuación N° 2

Si el núcleo está formado por dos o más materiales (Figura 14 c) la Fmm total será la SUMA de las Fmm de cada parte del núcleo; es decir:

$$\Rightarrow \boxed{F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n} \Rightarrow \boxed{F_T = H_1 \cdot L_1 + H_2 \cdot L_2 + \dots + H_n \cdot L_n}$$

Un “Electroimán” consiste en un núcleo de material ferromagnético (hierro y sus aleaciones por lo general), rodeado por una bobina, el cual se puede imantar a voluntad cuando hacemos circular una corriente eléctrica por las espiras; pero que además se desimanta en el momento en que interrumpimos la circulación de la corriente (imanes temporales). Veamos algunas características básicas de este tipo de componentes de gran aplicación tecnológica:

Tipos de Electroimanes



**FUERZA ATRACTIVA DEL ELECTROIMÁN:**

La fuerza con la que atrae un electroimán a la pieza de hierro móvil (llamada “armadura”) a través del aire o bien del entrehierro, se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

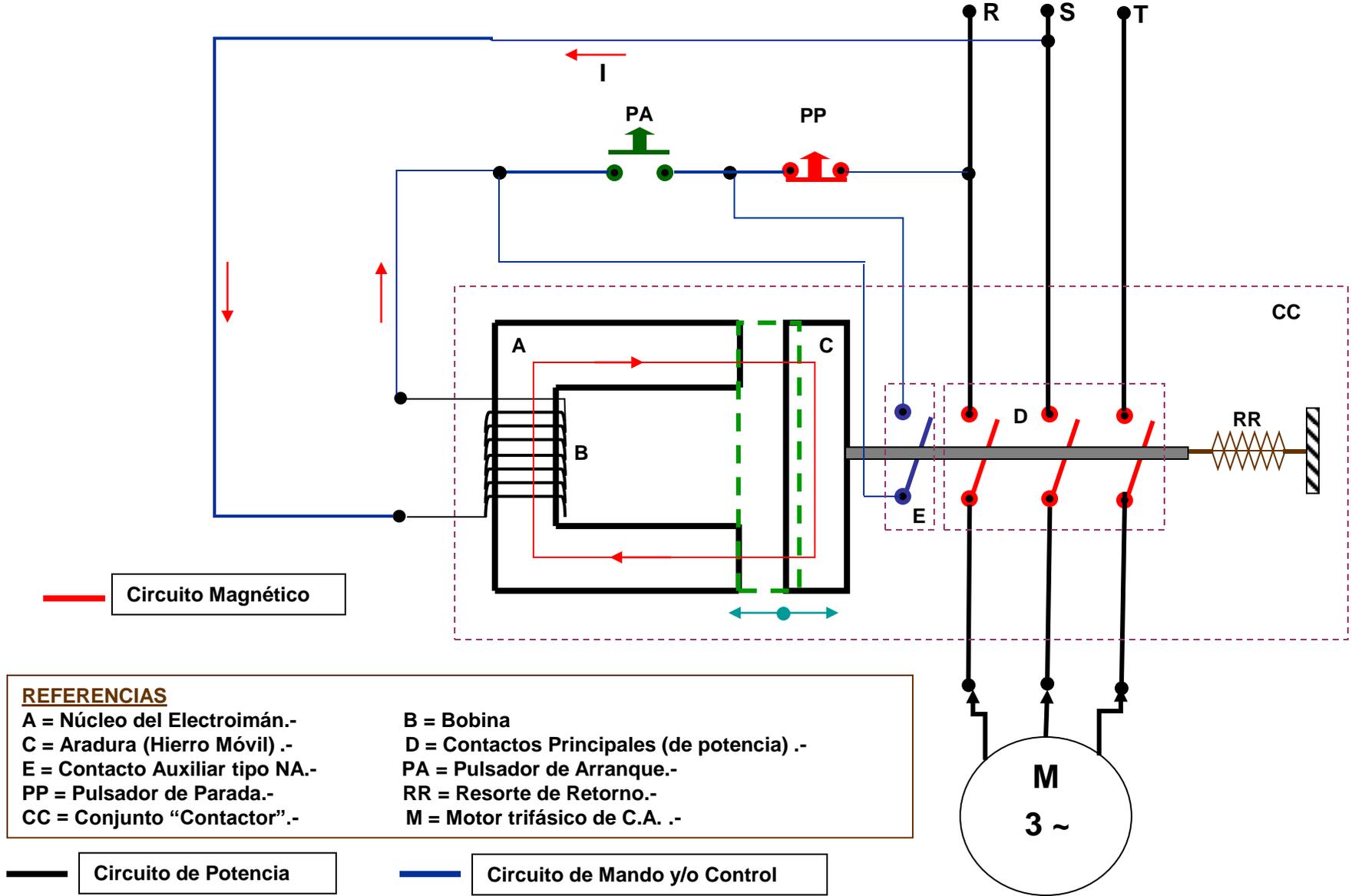


$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S \text{ expresada en [Kgf]}$$



$$F = 392,4 \cdot B^2 \cdot S \Rightarrow F \approx 400 \cdot B^2 \cdot S \text{ expresada en [KN]}$$

(Continuación) ELECTROMAGNETISMO: Aplicación de Circuitos Magnéticos - Mecanismo Básico de Contactores



**REFERENCIAS**

A = Núcleo del Electroimán.-  
 C = Aradura (Hierro Móvil) .-  
 E = Contacto Auxiliar tipo NA.-  
 PA = Pulsador de Arraque.-  
 CC = Conjunto "Contactor" .-

B = Bobina  
 D = Contactos Principales (de potencia) .-  
 PP = Pulsador de Parada.-  
 RR = Resorte de Retorno.-  
 M = Motor trifásico de C.A. .-