

5.1. El imán

Un imán es un material que es capaz de generar un campo magnético. El efecto del magnetismo se conoce desde la antigüedad, donde se conocía los efectos de una piedra llamada magnetita. Uno de sus usos fue en el empleo de la brújula, la cual se orienta hacia los polos norte y sur.



Figura 5.1. Brújula

5.1.1. Polos de un imán

Las zonas de atracción máxima de un imán se denominan polos, existiendo dos polos: polo norte y polo sur. El punto o línea intermedia que separa ambos polos se denomina línea neutra donde no se produce atracción.



Figura 5.2. Polos de un imán

Cuando se sitúan dos imanes con libertad de movimiento próximos entre sí, se produce una interacción entre ambos, observándose los siguientes efectos:

- Los polos iguales se repelen.
- Los polos diferentes se atraen.

5.1.2. Clases de imanes

Existen dos clases de imanes. Los **imanes naturales** son aquellos que se encuentran en la naturaleza, como la magnetita. No tienen utilidad industrial.

Los **imanes artificiales** son aquellos que, partiendo de material ferromagnético, adquieren propiedades magnéticas. A su vez, su efecto magnético puede ser **permanente** (mantienen sus propiedades durante un largo periodo de tiempo) o **temporales** (su efecto desaparece cuando cesa la acción magnetizante).

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

5.1.3. Magnetización y desmagnetización

En el interior de la materia existen pequeñas corrientes circulares debido al movimiento de los electrones que componen los átomos. Cada una de ellas origina un diminuto imán llamado **dipolo magnético** o **dominio magnético**.

Cuando la orientación de estos dipolos magnéticos es en todas direcciones, sus efectos se anulan y el material no muestra un comportamiento magnético. En cambio, cuando todos los dipolos magnéticos están orientados en la misma dirección sus efectos se acumulan y es entonces cuando muestra un comportamiento magnético.



Estructura magnética desordenada



Estructura magnética ordenada



Rotura del imán

Figura 5.3. Estructura magnética de un cuerpo (desordenada y ordenada)

Para crear un imán artificial se debe magnetizar estos materiales ferromagnéticos sometiéndolos a un campo magnético.

Si un imán se rompe, por ejemplo por la línea neutra, no se obtienen dos polos independientes sino que las dos piezas tienen cada una de ellas su polo norte y su polo sur. Este imán se puede romper sucesivamente hasta llegar al dipolo magnético.



Figura 5.4. Rotura de un imán

Cuando el material a magnetizar se sitúa en un campo magnético, sus dipolos magnéticos se van orientando por efecto de la fuerza del campo inductor. Una vez alineados todos, se alcanza el punto de **saturación**.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Esta orientación magnética puede alterarse por efecto de calor. Si el hierro se calienta por encima de 760 °C (punto de Curie) pierde sus propiedades ferromagnéticas debido al incremento energético a nivel molecular. Esta situación es reversible.

5.1.4. Tipos de materiales

Los materiales según su comportamiento frente a un campo magnético se clasifican en:

- **Ferromagnéticos.** Son aquellos que tienden a orientar sus dipolos magnéticos en la misma dirección que el campo magnético externo. Son el hierro, níquel, cobalto y sus aleaciones. Tienen aplicación industrial al emplearse en máquinas eléctricas.
- **Paramagnéticos.** Son aquellos que no muestran ningún efecto al situarse bajo la influencia de un campo magnético. Algunos de estos materiales son el aluminio, platino, etcétera.
- **Diamagnéticos.** Son aquellos materiales que al situarse bajo la influencia de un campo magnético tienden a orientarse en sentido contrario al campo. Un material de este tipo es el bismuto.

Para crear imanes de efecto permanente se emplea aleaciones de acero con tungsteno, acero con cobalto, acero con titanio, hierro con níquel, etc. Estos materiales se denominan **materiales ferromagnéticos duros**.

Para crear imanes de efecto temporal se emplea generalmente chapa de acero aleada con silicio. Estos imanes se emplean para la construcción de transformadores, motores, generadores, etc. Estos materiales se denominan **materiales ferromagnéticos blandos**.

5.1.5. Campo magnético de un imán

Cuando se coloca un imán debajo de una hoja y por encima de esta se colocan limaduras de hierro, estas son atraídas por los polos del imán. La mayoría de estas se mueven hasta situarse en los polos, pero hay otras que van dibujando una serie de líneas que van de polo a polo. Estas líneas se denominan **líneas de fuerza del campo magnético**.

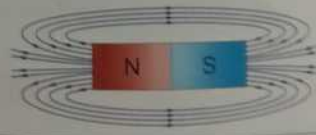


Figura 5.5. Líneas de fuerza de un imán

A mayor concentración de líneas de fuerza, mayor es el efecto del campo magnético.

Por convencionalismo se dice que las líneas de fuerza de un campo magnético salen por el polo norte y entran por el polo sur.

Si se colocan dos imanes próximos encarándolos sus polos se observa que las líneas de fuerza del campo se repelen.



Figura 5.6. Efecto de repulsión de las líneas de fuerza

Si se colocan dos imanes próximos encarándolos polos diferentes se observa que las líneas de fuerza del campo se atraen.

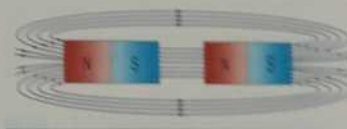


Figura 5.7. Efecto de atracción de las líneas de fuerza

5.2. Electromagnetismo

Los primeros experimentos en los cuales se descubrió que existe una relación entre la corriente eléctrica y los campos magnéticos, los llevó a cabo Oersted en 1819 cuando colocó una brújula cerca de un conductor eléctrico. Observó que, al circular una corriente eléctrica por el conductor, la brújula se desviaba, llegando a la conclusión que las corrientes eléctricas crean campos magnéticos.

5.2.1. Campo magnético creado por un conductor

Cuando un conductor es recorrido por una corriente eléctrica, se crea alrededor de este un campo magnético. Las líneas de fuerza concéntricas aparecen a lo largo de todo el conductor.

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza se aplica la ley de Maxwell o del sacacorchos, que postula que el sentido de las líneas de fuerza concéntricas al conductor es el que indicaría el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente.

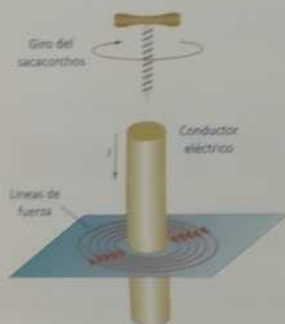


Figura 5.3. Regla de Maxwell o del sacacorchos.

Para dibujar el sentido de la corriente en un conductor se emplea un punto para indicar que la corriente sale del plano o dibujo y se emplea una aspa para indicar que la corriente entra en dirección al plano o dibujo.



Figura 5.4. Representación del sentido de la corriente en un plano o dibujo.

Cuando un conductor se enrolla en forma de bobina, el campo magnético de cada espira se suma a la siguiente espira, de tal manera que se consiguen campos magnéticos más intensos.

5.2.2. Campo magnético creado por una bobina

Un conductor recto produce un campo magnético muy débil y disperso. Para concentrar las líneas de fuerza, se dispone el conductor en forma de espira, y si además se dispone de

varias espiras, el efecto se suma concentrándose de manera uniforme en el interior de esta.

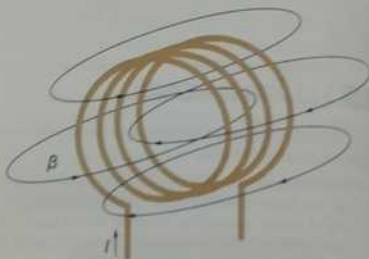


Figura 5.5. Campo magnético en una bobina.

5.3. Magnitudes

5.3.1. Flujo magnético

La cantidad de líneas de fuerza se denomina flujo magnético. Se representa por la letra Φ y su unidad en el sistema internacional es el **weber** (Wb).

Tabla 5.1. Flujo magnético

Magnitud	Unidad de medida
Φ Flujo magnético	Wb Weber

5.3.2. Inducción magnética

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesa perpendicularmente la unidad superficial.

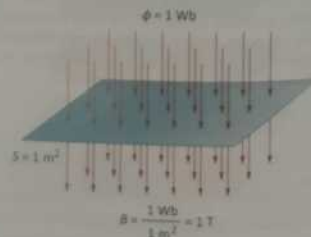


Figura 5.6. Inducción magnética.

La inducción magnética se representa por la letra β y su unidad en el sistema internacional es el **tesla** (T).

Tabla 5.2. Flujo magnético

Magnitud	Unidad de medida
β Inducción magnética	T Tesla

La expresión que define el tesla es:

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

$$1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T}$$

A mayor cantidad de líneas de fuerza por unidad de superficie, mayor inducción magnética.

Actividad resuelta 5.1

¿Cuál es el flujo magnético producido por una bobina que tiene un núcleo cuadrado de 5 cm de lado y una inducción magnética de 2 T?

Solución:

Despejando de la expresión, se obtiene:

$$\Phi = \beta \cdot S$$

La superficie es de:

$$S = l^2 = 5^2 = 25 \text{ cm}^2 = 0,0025 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$\Phi = \beta \cdot S = 2 \cdot 0,0025 = 5 \text{ mWb}$$

5.3.3. Fuerza magnetomotriz

La fuerza magnetomotriz es la capacidad que posee una bobina de generar líneas de fuerza. Se representa por la letra \mathcal{F} y su unidad es el **amperio-vuelta** (Av).

Tabla 5.3. Flujo magnético

Magnitud	Unidad de medida
\mathcal{F} Fuerza magnetomotriz	Av Amperio-vuelta

La expresión que define la fuerza magnetomotriz es:

$$\mathcal{F} = N \cdot I$$

Donde:

\mathcal{F} : Fuerza magnetomotriz (Av).

N : Número de espiras.

I : Intensidad (A).

Actividad resuelta 5.2

¿Cuál es la fuerza magnetomotriz de una bobina de 300 espiras por la que circula una corriente de 1,8 A? ¿Y si tiene 500 espiras?

Solución:

La fuerza magnetomotriz viene determinada por la expresión:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 300 \text{ espiras} \cdot 1,8 \text{ A} = 540 \text{ Av}$$

Si ahora tiene 500 espiras:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 500 \cdot 1,8 = 900 \text{ Av}$$

5.3.4. Intensidad de campo magnético

La intensidad de campo magnético relaciona la fuerza magnetomotriz con la longitud (l) de la bobina según la expresión:

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{N \cdot I}{l}$$

Donde:

H : Intensidad de campo magnético (Av/m).

N : Número de espiras.

I : Intensidad (A).

l : Longitud (m).

Tabla 5.4. Intensidad de campo magnético

Magnitud	Unidad de medida
H Intensidad de campo magnético	Av/m Amperio-vuelta/metro

Actividad resuelta 5.3

¿Cuál es la intensidad de campo magnético en el interior de una bobina cuya línea media es un rectángulo de 4 cm por 5 cm de lado de 600 espiras circulando una corriente 3,6 A?

Solución:

La intensidad de campo magnético viene determinada por la expresión:

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

La longitud, teniendo en cuenta que es un rectángulo, nos da la línea media:

$$l = 4 + 5 + 4 + 5 = 18 \text{ cm} = 0,18 \text{ m}$$

Sustituyendo valores:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{600 \cdot 3,6}{0,18} = 12\,000 \text{ Av/m}$$

5.3.5. Reluctancia

La reluctancia es la resistencia que ofrece un material al establecimiento de las líneas de fuerza. Los materiales ferromagnéticos tienen una baja reluctancia.

Se define por la ley de Hopkinson como:

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

Donde:

\mathcal{R} : Reluctancia (Av/Wb).

\mathcal{F} : Fuerza magnetomotriz (Av).

Φ : Flujo magnético (Wb).

Tabla 5.5. Reluctancia

Magnitud	Unidad de medida
\mathcal{R} Reluctancia	Av/Wb Amperio-vuelta/weber

La ley de Hopkinson para circuitos magnéticos es análoga a la ley de Ohm para circuitos eléctricos.

Tabla 5.6. Comparativa de magnitudes eléctricas con magnéticas

Magnitudes eléctricas	Magnitudes magnéticas
Resistencia: $R (\Omega)$	Reluctancia: $\mathcal{R} (\text{Av/Wb})$
Intensidad: $I (\text{A})$	Flujo: $\Phi (\text{Wb})$
t. e. m.: $E (\text{V})$	t. m. m.: $\mathcal{F} (\text{Av})$
Ley de Ohm:	Ley de Hopkinson:
$I = \frac{E}{R}$	$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Actividad resuelta 5.4

¿Cuál es la reluctancia del núcleo de una bobina de 750 espiras por la que circula una corriente de 2,4 A creando un flujo magnético de 4 mWb?

Solución:

La reluctancia viene determinada por la expresión:

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

Primero se calcula la fuerza magnetomotriz:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 750 \cdot 2,4 = 1800 \text{ Av}$$

Sustituyendo:

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{1800}{4 \cdot 10^{-3}} = 450\,000 \text{ Av/Wb}$$

5.4. Magnetización

Cuando un material ferromagnético se somete a la acción de un campo magnético cuya intensidad de campo magnético (H) es creciente, la inducción magnética (B) también aumenta, pero no lo hace de manera constante.

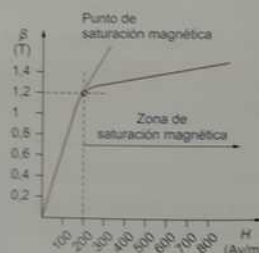


Figura 5.12. Curva de magnetización (con zona y punto de saturación magnética).

En la curva de magnetización para un material, como por ejemplo el representado en la Figura 5.12, se observa que crece de manera proporcional hasta que llega a un punto (punto de saturación) en el cual, aunque se aumenta la intensidad del campo magnético (H), la inducción magnética crece ahora de una manera más lenta. La saturación magnética ocurre cuando prácticamente la totalidad de los dipolos magnéticos ya se han orientado y al seguir aumentando la intensidad de campo magnético apenas se aprecia un aumento de la inducción.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

5.5. El ciclo de histéresis magnética

Cuando un material ferromagnético se somete a un campo magnético alterno, la inducción magnética (B) varía en función de la intensidad de campo magnético (H) describiendo una trayectoria que es diferente según el sentido de esta intensidad de campo.

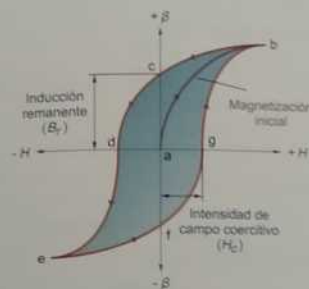


Figura 5.13. Curva de histéresis magnética.

Partiendo de un material que nunca se ha sometido a un campo magnético (punto a) se le somete a un campo magnético cuya intensidad aumenta describiendo una curva (a-b) hasta que se alcanza el punto de saturación magnética (punto b).

Posteriormente se reduce la intensidad de campo magnético hasta anularla (punto c). Se observa que el material mantiene cierto nivel de inducción a pesar de que la intensidad de campo magnético es nula. A este efecto se le denomina **magnetismo remanente** (B_r).

Se invierte el sentido de la intensidad de campo magnético hasta que la inducción se hace nula (punto d) y por tanto eliminando el magnetismo remanente.

A la intensidad de campo magnético necesario para eliminar el magnetismo remanente se le denomina **campo coercitivo** (H_c).

Si se sigue aumentando la intensidad de campo magnético en este sentido negativo, se alcanza el punto de saturación magnética (punto e).

A partir de aquí se invierte la intensidad de campo (siendo de valor positivo) y se aumenta hasta que la inducción se anula (punto f).

Si se sigue aumentando, se alcanza el punto (g) donde es necesario una intensidad de campo para el cual la inducción es nula.

A partir de aquí se repite el ciclo, observando que en ningún momento vuelve a pasar por el punto a.

Este ciclo de histéresis provoca unas **pérdidas de rendimiento** que se manifiestan en un calentamiento. Este calentamiento es debido al esfuerzo de invertir el campo magnético en los dipolos magnéticos, siendo mayor cuanto mayor sea la oposición o resistencia al cambio en las moléculas.

Para la fabricación de imanes permanentes, interesa emplear materiales cuyo campo coercitivo sea lo más amplio posible. Son los denominados **materiales ferromagnéticos duros**.

Para la fabricación de máquinas eléctricas (transformadores, motores y generadores) interesa que el campo coercitivo sea lo más estrecho posible. Son los denominados **materiales ferromagnéticos blandos**, como es la ferrita y las aleaciones de hierro.

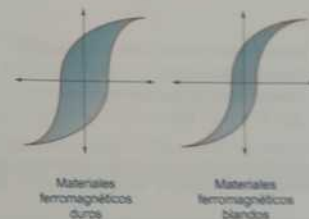


Figura 5.14. Curva de histéresis magnética según el tipo de material ferromagnético.

Sabías que...

La última generación de materiales magnéticos la representan los imanes de neodimio, los cuales poseen unas propiedades magnéticas muy superiores a los tradicionales. Poseen una alta coercitividad y elevada remanencia. Son los de mayor campo y además son baratos de producir. Gracias a estas cualidades permiten la fabricación de diversos dispositivos reduciendo sus dimensiones (motores, altavoces, microondas, etc.).

5.6. Permeabilidad magnética

Cuando en el interior del núcleo de una bobina se introduce un material ferromagnético, se observa que aumentan las líneas de fuerza del campo magnético:

$$B = \mu \cdot H$$

Este factor multiplicador se denomina permeabilidad y relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo.

La inducción magnética después de introducir este material vendrá determinada por la expresión:

$$\beta = \mu_r \cdot \beta_0$$

Donde:

β : Inducción magnética con núcleo ferromagnético.

β_0 : Inducción magnética con núcleo de aire.

μ_r : Permeabilidad relativa.

La permeabilidad relativa indica la mejora del campo magnético con núcleo ferromagnético respecto al mismo con núcleo de aire. Se puede expresar como:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Donde:

μ : Permeabilidad absoluta (H/m, henrios/metros).

μ_r : Permeabilidad relativa.

μ_0 : Permeabilidad del aire o en vacío,

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

Cada material ferromagnético tiene su coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor sea este, mejor será su comportamiento magnético.

Tabla 5.7. Relación β y H de varios materiales

β (T)	H (A/m)		
	Hierro forjado	Chapa normal	Chapa al silicio
0.1	80	50	90
0.3	120	65	140
0.5	160	100	170
0.7	230	180	240
0.9	400	380	350
1.1	650	675	530
1.3	1000	1200	1300
1.5	2400	2200	5000
1.6	6300	3500	9000
1.7	7000	6000	15 500
1.8	11 500	10 000	27 500
1.9	17 000	18 000	
2	27 000	32 000	

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Actividad resuelta 5.5

Calcula la permeabilidad absoluta y relativa para una bobina con núcleo que desarrolla un flujo magnético de 8 mWb si posee 900 espiras con una superficie de núcleo de 40 cm² y una longitud media de núcleo de 30 cm y circulando una corriente de 10 A.

Solución:

La inducción magnética es de:

$$\beta = \frac{\Phi}{S} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-4}} = 2 \text{ T}$$

La intensidad de campo es de:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{900 \cdot 10}{30 \cdot 10^{-2}} = 30\,000 \text{ A/m}$$

La permeabilidad absoluta es de:

$$\mu = \frac{\beta}{H} = \frac{2}{30\,000} = 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ H/m}$$

La permeabilidad relativa es de:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{6.6 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 53$$

Si el núcleo hubiese sido al aire, el sistema hubiese sido 53 veces más débil.

5.7. El coeficiente de autoinducción

La autoinducción o **inductancia** es la propiedad que poseen las bobinas de oponerse a los cambios de la corriente que circula por ellos. Como magnitud se denomina coeficiente de autoinducción, se representa por la letra L y su unidad es el henrio (H).

Tabla 5.8. Coeficiente de autoinducción

Magnitud	Unidad de medida
L Coeficiente de autoinducción	H Henrio

El coeficiente de autoinducción relaciona la intensidad que circula por la bobina con el flujo generado, que para una bobina de N espiras es de:

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

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

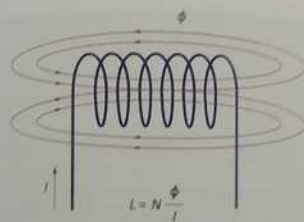


Figura 5.13. Coeficiente de autoinducción.

Donde:

L : Coeficiente de autoinducción (H, henrios).

Φ : Flujo magnético (Wb, weber).

I : Intensidad (A, amperios).

N : Número de espiras.

Teniendo en cuenta que el flujo se puede expresar como:

$$\Phi = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l} \cdot S$$

Igualando:

$$\Phi = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l} \cdot S = \frac{L \cdot I}{N}$$

Y despejando L :

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

Donde:

L : Coeficiente de autoinducción (H, henrios).

μ_0 : Permeabilidad en vacío ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, henrios/metros).

N : Número de espiras.

S : Sección de la bobina (m²).

l : Longitud de la bobina (m).

Esta expresión tiene en cuenta las características físicas de la bobina.

5.7.1. Bobina con núcleo

Cuando el núcleo es diferente al aire y es de un material ferromagnético, como puede ser las chapas de hierro, estos concentran las líneas de fuerza aumentando el flujo magnético y por tanto el coeficiente de autoinducción.

Si el flujo viene definido por la expresión:

$$\Phi = \beta \cdot S$$

Y:

$$\beta = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Sustituyendo se obtiene que el coeficiente de autoinducción, teniendo en cuenta el núcleo diferente al aire, es de:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

5.7.2. Energía almacenada en una bobina

La energía que almacena la bobina considerada ideal (con resistencia eléctrica nula) viene definida por la expresión:

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Donde:

E : Energía (J, julios).

L : Coeficiente de autoinducción (H, henrios).

I : Corriente (A, amperios).

5.8. Cálculo de circuitos magnéticos

Un circuito magnético es aquel camino cerrado generalmente de material ferromagnético por el cual actúa una fuerza magnetomotriz.

Su cálculo es complejo porque si se presentan entrehierros entonces aparecen dispersiones de flujo, los circuitos son de formas geométricas generalmente complejas y, por otro lado, la reluctancia no es constante sino que varía entre límites.

Cuando se diseña un circuito magnético se tiene en cuenta una serie de consideraciones:

- Reducir el entrehierro al mínimo.
- Evitar la saturación del material.
- Reducir todo lo posible la dispersión del flujo magnético, adoptando formas geométricas favorables.

Se resuelve de manera análoga a la resolución de circuitos eléctricos, pero aplicando magnitudes magnéticas.

Los circuitos magnéticos pueden ser:

- Circuito magnético serie.
- Circuito magnético paralelo.

En un **circuito magnético serie**, la reluctancia total es la suma de las reluctancias:

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

La reluctancia se puede expresar en función sus características físicas. Partiendo de la expresión:

$$R = \frac{l}{\mu}$$

Y teniendo en cuenta las siguientes relaciones:

$$\Phi = B \cdot S \quad B = \mu \cdot H \quad H = \frac{F}{l}$$

Se sustituye, obteniendo:

$$R = \frac{l}{\mu} = \frac{l}{\mu \cdot B \cdot S} = \frac{l}{\mu \cdot \Phi \cdot S} = \frac{l}{\mu \cdot \frac{F}{R} \cdot S} = \frac{l}{\mu \cdot F \cdot S}$$

En un circuito magnético paralelo, la inversa de la reluctancia total es la suma inversa de las reluctancias de la asociación, de manera similar a las resistencias en paralelo, así se tiene que:

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Actividad resuelta 5.6

Calcular la reluctancia total del circuito magnético de la figura, así como la fuerza magnética necesaria para atraer el núcleo móvil al estator de 1,2 T.



Figura 5.6. Circuito magnético paralelo.

Los datos del estator son: $l_1 = 40 \text{ cm}$, $l_2 = 40 \text{ cm}$ y $\mu_r = 4000$. La permeabilidad relativa es de 4000. Calcular la fuerza magnética necesaria para atraer el núcleo móvil al estator de 1,2 T.

Solución:

La reluctancia del estator será:

$$R_{\text{estator}} = R_{\text{estator}} + R_{\text{núcleo}}$$

$$R_{\text{estator}} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} = \frac{l_1}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S_1} = \frac{80 \cdot 10^{-2}}{4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 40 \cdot 10^{-4}} = 39 \, 789 \text{ A/Vb}$$

$$R_{\text{núcleo}} = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2} = \frac{l_2}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S_2} = \frac{63 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 40 \cdot 10^{-4}} = 596 \, 831 \text{ A/Vb}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{estator}} + R_{\text{núcleo}} = 636 \, 620 \text{ A/Vb}$$

Para obtener la fuerza magnética, se parte de:

$$R = \frac{l}{\mu} \quad \mu = \frac{l}{R} \quad F = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu}$$

Se calcula el flujo en el estator:

$$\Phi = B \cdot S = 1,2 \cdot 40 \cdot 10^{-2} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Considerando la dispersión del 15 %, se debe dividir entre 0,85 que corresponde a 100 % - 15 %:

$$\Phi = \frac{\Phi}{0,85} = \frac{4,8 \cdot 10^{-3}}{0,85} = 5,65 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Sustituyendo:

$$F = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu} = \frac{5,65^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 636 \, 620} = 2595 \text{ N}$$

5.9. El electroimán

Un electroimán es un elemento compuesto por un arrollamiento sobre un núcleo de material ferromagnético. Cuando circula una corriente eléctrica, se imanta. Al cesar la corriente eléctrica, se desmagnetiza.



Figura 5.7. Electroimán.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Al montarse, se comporta como un imán y atrae a la parte móvil o armadura. Al desmontarse, un muelle o resorte separa a la armadura colocándola en su posición inicial o de reposo. La fuerza de atracción viene determinada por la expresión:

$$F = 40 \, 000 \cdot B^2 \cdot S$$

Donde:

F: Fuerza de atracción (kp, kilopondios).

B: Inducción magnética.

S: Superficie de contacto entre el núcleo y la armadura móvil.

Recuerda:

Si es necesario expresar la fuerza en newton, la conversión es:

$$1 \text{ kp} = 9,8 \text{ N}$$

Actividad resuelta 5.7

Determina la fuerza de atracción que se ejerce sobre la armadura si la inducción del núcleo es de 0,9 T. ¿Cuál es la corriente necesaria, si la bobina cuenta con 1200 espiras y el núcleo es de chapa normal?

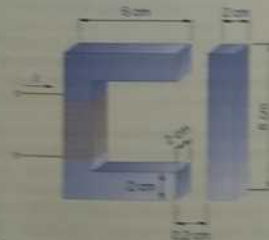


Figura 5.7. Electroimán.

Solución:



Figura 5.7. Línea media del campo magnético.

La superficie de atracción, teniendo en cuenta que son dos polos y de forma cuadrada de 2 cm de lado, es de:

$$S = 2 \text{ polos} \cdot 2 \text{ cm} \cdot 2 \text{ cm} = 8 \text{ cm}^2 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

La fuerza de atracción será de:

$$F = 40 \, 000 \cdot B^2 \cdot S$$

$$F = 40 \, 000 \cdot 0,9^2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 26 \text{ kp}$$

Para determinar la corriente partimos de:

$$F = N \cdot I \quad I = \frac{F}{N}$$

Para determinar la fuerza magnética hay que tener en cuenta la chapa y el estator (espacio entre el núcleo y la armadura):

$$F = F_{\text{chapa}} + F_{\text{estator}}$$

Si:

$$F = B \cdot I$$

Para el núcleo, teniendo en cuenta que es de chapa normal y la inducción es de 0,9 T, se consulta la Tabla 5.7. Donde nos da una intensidad de campo de 360 A/m, y la longitud del núcleo es de:

$$l_{\text{núcleo}} = 6 + 6 + 6 + 6 = 24 \text{ cm} = 0,24 \text{ m}$$

$$F_{\text{chapa}} = B \cdot I = 360 \cdot 0,24 = 86,4 \text{ N}$$

Para el estator, como es aire:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-4}} = 716 \, 200 \text{ A/Vb}$$

$$l_{\text{estator}} = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_{\text{estator}} = B \cdot I = 716 \, 200 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 2864,8 \text{ N}$$

Por tanto:

$$F = F_{\text{chapa}} + F_{\text{estator}} = 86,4 + 2864,8 = 2951,2 \text{ N}$$

$$I = \frac{F}{N} = \frac{2951}{1200} = 2,46 \text{ A}$$

Recuerda:

La fuerza magnética (F) en newtons, es proporcional a la corriente y al número de espiras, siendo ambas directamente proporcionales. Para obtener una misma fuerza magnética se va aumentando el número de espiras a la corriente disminuye.

$$F = N \cdot I$$

5.10. Inducción electromagnética

La inducción electromagnética es la generación de electricidad por la acción de un campo magnético variable. Estos son los principios en los cuales se basa la generación de corriente eléctrica.

5.10.1. Ley de Faraday

La ley de Faraday dice que si se varía el flujo magnético que atraviesa la sección de un conductor, se produce una tensión en los bornes de este:

$$E_{\text{inducida}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Si se emplea una bobina con N espiras, se tiene que:

$$E_{\text{inducida}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Indicando que la f. e. m. inducida viene determinada por la variación del flujo magnético respecto al tiempo y multiplicado por el número de espiras (N). El signo negativo se debe a la ley de Lenz.

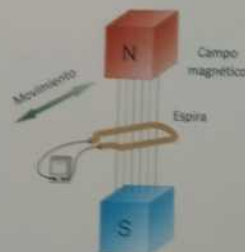


Figura 5.20. Experimento de Faraday.

Se demuestra que si en un campo magnético se coloca un conductor y se le somete a un movimiento de tal manera que corte perpendicularmente a las líneas de fuerza, se induce una corriente eléctrica que es detectada por el aparato de medida.

El valor de la f. e. m. inducida del conductor que se mueve dentro de este campo magnético se puede expresar como:

$$E_{\text{inducida}} = \beta \cdot l \cdot v$$

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Donde:

β : inducción magnética (T, teslas).

l : longitud (m, metros).

v : velocidad (m/s, metros/segundos).

Actividad resuelta 5.8

Calcula la fuerza electromotriz inducida en un conductor que se desplaza a 2 m/s perpendicularmente a un campo magnético con una inducción de 1 T que tiene una longitud dentro del campo de 25 cm.

Solución:

El valor de la f. e. m. inducida en el conductor es de:

$$E_{\text{inducida}} = \beta \cdot l \cdot v$$

$$E_{\text{inducida}} = 1 \cdot 0,25 \cdot 2 = 0,5 \text{ V}$$

5.10.2. Ley de Lenz

La ley de Lenz se basa en el principio de acción-reacción, e indica que el sentido de la corriente eléctrica inducida es tal que tiende a oponerse a la causa que la origina.

Partiendo del experimento de situar un conductor en un campo magnético y realizar un movimiento, se crea un campo magnético que se opone al movimiento del conductor ejerciendo una resistencia.

Para determinar el sentido de la corriente inducida se emplea la **regla de Fleming de la mano derecha**. Se coloca el pulgar en ángulo recto respecto a la mano, que indica el movimiento del conductor. El índice se coloca perpendicular al pulgar, indicando el sentido del flujo magnético (de polo norte a polo sur) y el dedo corazón se coloca perpendicular al pulgar y al índice, indicando el sentido de la corriente (sentido convencional).



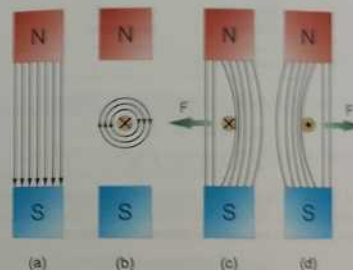
Figura 5.21. Regla de la mano derecha.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

La regla de la mano derecha se emplea en los generadores donde es el conductor el que se mueve dentro del campo magnético.

5.11. Fuerza sobre un conductor

Si en el interior de un campo magnético se sitúa un conductor eléctrico por el cual circula una corriente aparece una fuerza que tiende a desplazarlo.



- (a) Campo creado por un imán.
- (b) Campo creado por una corriente.
- (c) Fuerza creada por un campo y una corriente. Sentido entrante.
- (d) Fuerza creada por un campo y una corriente. Sentido saliente.

Figura 5.22. Fuerza en un conductor dentro de un campo magnético cuando es recorrido por una corriente.

Para determinar el sentido de la fuerza se aplica la **regla de Fleming de la mano izquierda**. Se sigue la misma mecánica que con la aplicación de la mano derecha. Se aplica en motores para determinar el movimiento generado al aplicar una corriente.



Figura 5.23. Regla de la mano izquierda.

El valor de esta fuerza, denominada **fuerza de Laplace**, viene determinada por la expresión:

$$F = \beta \cdot l \cdot I$$

Donde:

F : Fuerza (N, newtons).

β : Inducción (T, teslas).

l : Longitud del conductor (m, metros).

I : Intensidad (A, amperios).

La aplicación práctica de la teoría de la fuerza generada por un conductor por el cual circula una corriente y situado dentro de un campo magnético es la base de funcionamiento de los motores eléctricos.

Actividad resuelta 5.9

Calcula la fuerza que el campo magnético ejerce sobre un conductor de 25 cm de longitud que es recorrido por una corriente de 20 A. El conductor está situado dentro del campo magnético y perpendicularmente. La inducción del campo magnético es de 0,8 T.

Solución:

Aplicando la expresión de la fuerza de Laplace:

$$F = \beta \cdot l \cdot I$$

$$F = 0,8 \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 20 = 4 \text{ N}$$

5.12. Corrientes parásitas de Foucault

Las corrientes de Foucault son corrientes que se producen en el interior del núcleo conductor cuando es sometido a un campo magnético variable. Estas corrientes circulan por el interior generando un calentamiento y son pérdidas de rendimiento para la máquina eléctrica.

Con objeto de minimizar estas pérdidas, limitando las corrientes por el conductor, se recurre a construir bobinas en forma de chapa aisladas entre sí.

Estas chapas se aíslan mediante un barniz y se fabrican aleándolas con silicio para aumentar la resistividad, de esta manera se consiguen buenos núcleos magnéticos con unas corrientes parásitas reducidas.

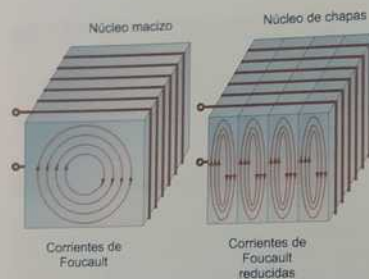


Figura 5.24. Reducción de corrientes parásitas de Foucault.

Otra solución para reducir las corrientes parásitas de Foucault consiste en emplear materiales para el núcleo que sean malos conductores.

Sabías que...

Existen aplicaciones donde se aprovechan las corrientes de Foucault, por ejemplo en los hornos y cocinas de inducción, en los cuales se aprovecha el calentamiento producido por estas corrientes.

5.13. El transformador eléctrico

El transformador es una máquina eléctrica que se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética.

Una bobina con núcleo ferromagnético (primaria) es recorrida por una corriente variable, que da lugar a un campo magnético variable. En su proximidad se coloca otra bobina (secundaria), la cual por efecto del campo magnético variable de la primaria induce una f. e. m. en el conductor de la bobina secundaria.

El valor eficaz de la fuerza electromotriz viene determinado por la expresión:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N$$

Donde:

- E : Fuerza electromotriz (V, voltios).
- Φ : Flujo máximo (Wb, weber).
- f : Frecuencia (Hz, hercios).
- N : Número de espiras.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

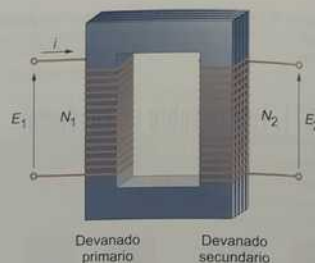


Figura 5.25. Transformador monofásico.

Así, para el primario y el secundario se tiene que:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_1$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_2$$

La tensión obtenida en el secundario depende de la tensión del primario, así como del número de espiras de ambas bobinas, según la **relación de transformación** (m).

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Donde:

- m : Relación de transformación.
- E_1 : Fuerza electromotriz del primario (V, voltios).
- E_2 : Fuerza electromotriz del secundario (V, voltios).
- N_1 : Número de espiras del primario.
- N_2 : Número de espiras del secundario.
- I_1 : Corriente en el primario.
- I_2 : Corriente en el secundario.

Si el número de espiras del primario es igual a las del secundario, la relación de transformación es 1. Si el número de espiras del primario es mayor que la del secundario, se tiene un transformador reductor y la tensión del secundario es menor que la del primario. Si el número de espiras del secundario es mayor que en el primario se tiene un transformador elevador y la tensión del secundario es mayor que la del primario.

5.13.1. Ensayo en vacío del transformador

El ensayo en vacío consiste en hacer funcionar el transformador dejando a circuito abierto el devanado secundario y aplicando la tensión nominal al primario.

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Para realizar este ensayo se emplean los siguientes aparatos de medida:

- Primario: voltímetro, amperímetro, vatímetro.
- Secundario: voltímetro.

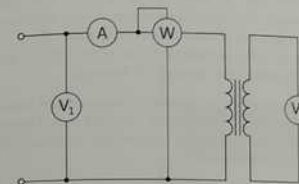


Figura 5.26. Esquema del ensayo en vacío del transformador.

Los objetivos de este ensayo son obtener las siguientes características del transformador:

- La relación de transformación (m).
- La corriente en vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe}).

Mediante los dos voltímetros se obtiene la relación de transformación:

$$m = \frac{E_1}{E_2}$$

Mediante el amperímetro se obtiene la corriente en vacío.

Mediante el vatímetro se obtienen las pérdidas en el hierro. La potencia en vacío (P_0) es de:

$$P_0 = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

Esta potencia corresponde a la suma de la potencia por efecto Joule más la potencia debida a la corriente de Foucault. Como está a circuito abierto, la corriente por efecto Joule es muy pequeña (depende de I_0) y son prácticamente despreciables, así que las pérdidas en el hierro:

$$P_{Fe} = P_0$$

Actividad resuelta 5.10

Un transformador monofásico se somete a un ensayo en vacío, dando las siguientes lecturas en los aparatos de medición:

- Voltímetro en el primario: 230 V.
- Voltímetro en el secundario: 40 V.

- Amperímetro en el primario: 300 mA.
- Vatímetro en el primario: 15 W.

Determina la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.

Solución:

La relación de transformación es:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{230}{40} = 5,75$$

Las pérdidas en el hierro corresponden a la lectura del vatímetro conectado en el primario:

$$P_{Fe} = \text{Lectura vatímetro} = 15 \text{ W}$$

La corriente de vacío corresponde a la lectura del amperímetro conectado en el secundario:

$$I_0 = \text{Lectura amperímetro} = 0,3 \text{ A}$$

5.13.2. Ensayo en cortocircuito del transformador

El ensayo en cortocircuito consiste en hacer funcionar el transformador cortocircuitando el devanado secundario, aplicando una tensión en el primario hasta obtener la intensidad nominal.

Para realizar este ensayo se emplean los siguientes aparatos de medida:

- Primario: voltímetro, amperímetro, vatímetro.
- Secundario: amperímetro.

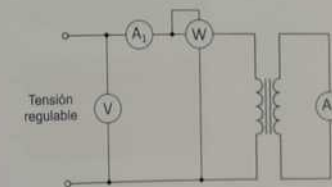


Figura 5.27. Esquema del ensayo en cortocircuito del transformador.

Los objetivos de este ensayo son obtener varios parámetros, siendo uno de ellos la determinación de las pérdidas en el cobre.

Se inicia el ensayo regulando la tensión del devanado primario. Se parte desde una tensión de cero voltios y se va aumentando lentamente hasta que en el amperímetro del primario (A_1) marque la intensidad nominal del transformador. Se toma la lectura de la corriente en el devanado secundario (A_2).

Como se trabaja con tensiones muy bajas respecto a la nominal del transformador, las pérdidas en el hierro son muy reducidas y se pueden considerar como despreciables. Con esta consideración, las pérdidas en el cobre son las obtenidas por la lectura del vatímetro:

$$P_{CE} = \text{Lectura del vatímetro} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

Estas pérdidas corresponden al efecto de calentamiento de los devanados primario y secundario.

5.13.3. Rendimiento del transformador

Partiendo de la expresión del rendimiento de las máquinas eléctricas, se tiene que:

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia total}} = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia útil} + \text{Pérdidas}}$$

La potencia total es la que el transformador absorbe en el primario de la red eléctrica. Parte de esta potencia se aprovecha para realizar un trabajo útil y parte se destina a las pérdidas.

Como:

$$\text{Potencia útil: } P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

$$\text{Pérdidas} = P_{FE} + P_{CU}$$

Sustituyendo se tiene:

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{FE} + P_{CU}}$$

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Expresado en forma de potencias:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{FE} + P_{CU}}$$

Las pérdidas en el hierro (P_{FE}) son prácticamente constantes y por tanto no dependen de la carga conectada al transformador. Las pérdidas en el cobre (P_{CU}) dependen de la carga ya que son debidas por el efecto Joule. Estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente o, dicho de otra manera, dependen del cuadrado de la carga.

Si se incorpora un parámetro denominado índice de carga (k) siendo el cociente de la corriente absorbida por el secundario (I_2) y la corriente nominal del secundario (I_{2N}):

$$k = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

Y se considera la situación en plena carga:

P_{2N} : Potencia nominal en el secundario.

P_{FE} : Pérdidas en el hierro (ensayo de vacío).

P_{CU} : Pérdidas en el cobre a plena carga (ensayo de cortocircuito).

Se tiene que:

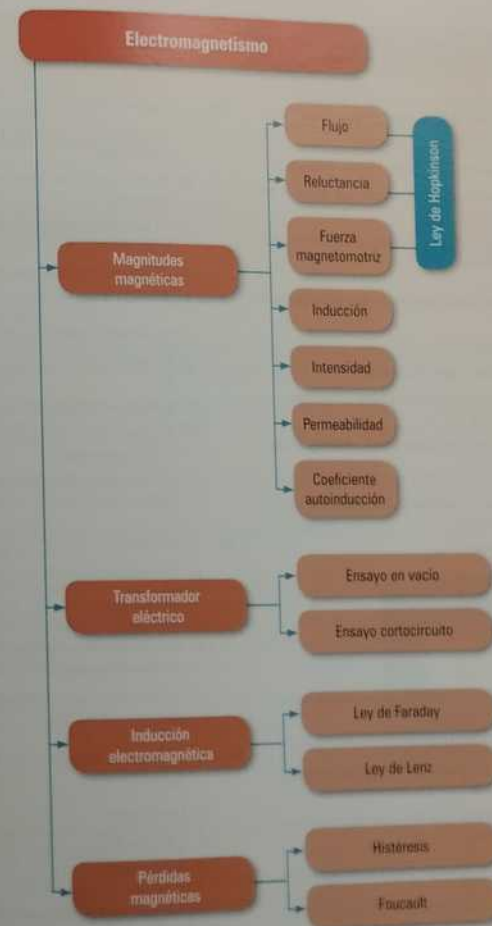
$$\eta = \frac{k \cdot P_{2N}}{k \cdot P_{2N} + P_{FE} + k^2 \cdot P_{CU}}$$

Este rendimiento será máximo cuando las pérdidas en el cobre y en el hierro sean iguales.

En este caso:

$$k = \sqrt{\frac{P_{FE}}{P_{CU}}}$$

Además, cuanto mayor sea el factor de potencia de la carga mayor será el rendimiento del transformador.



Actividades de comprobación

- 5.1. El punto de saturación magnética es aquel que:
- Limita el polo norte con el polo sur.
 - Todos los dominios magnéticos están alineados.
 - Permite magnetizar a otras sustancias situadas en su proximidad.
 - A partir de este punto, el material adquiere capacidades magnéticas.
- 5.2. Los materiales se clasifican según sus propiedades magnéticas en:
- Ferromagnéticos.
 - Ferromagnéticos y paramagnéticos.
 - Ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos.
 - Ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnéticos y aislamagnéticos.
- 5.3. Por convención, se dice que las líneas de fuerza en un campo magnético:
- Entran por el polo norte.
 - Entran por el polo sur.
 - Entran por cualquier polo.
 - Salen por cualquier polo.
- 5.4. El flujo magnético:
- Se representa por la letra Φ y su unidad es el weber.
 - Se representa por la letra β y su unidad el tesla.
 - Se representa por la letra R y su unidad es el amperio-vuelta/weber.
 - Se representa por la letra H y su unidad es el amperio-vuelta/metro.
- 5.5. La inducción magnética:
- Se representa por la letra Φ y su unidad es el weber.
 - Se representa por la letra β y su unidad el tesla.
 - Se representa por la letra R y su unidad es el amperio-vuelta/weber.
 - Se representa por la letra H y su unidad es el amperio-vuelta/metro.
- 5.6. La fuerza magnetomotriz:
- Se representa por la letra F y su unidad es el amperio-vuelta.
 - Se representa por la letra F y su unidad es el newton-vuelta.
 - Se representa por la letra M y su unidad es el amperio-vuelta.
 - Se representa por la letra M y su unidad es el newton-vuelta.
- 5.7. La intensidad de campo magnético:
- Se representa por la letra Φ y su unidad es el weber.
 - Se representa por la letra β y su unidad el tesla.
 - Se representa por la letra R y su unidad es el amperio-vuelta/weber.
 - Se representa por la letra H y su unidad es el amperio-vuelta/metro.
- 5.8. La reluctancia:
- Se representa por la letra Φ y su unidad es el weber.
 - Se representa por la letra β y su unidad el tesla.
 - Se representa por la letra R y su unidad es el amperio-vuelta/weber.
 - Se representa por la letra H y su unidad es el amperio-vuelta/metro.
- 5.9. La unidad de la permeabilidad absoluta es:
- Henrio.
 - Henrio/metro.
 - Henrio/weber.
 - Henrio/tesla.
- 5.10. Con el ciclo de histéresis se obtiene:
- El magnetismo remanente y el campo coercitivo.
 - El campo coercitivo y la fuerza magnetomotriz.
 - La fuerza magnetomotriz y la permeabilidad magnética.
 - La permeabilidad magnética y la intensidad de campo magnético.

- 5.11. Mediante el ensayo en vacío del transformador se obtiene:
- Las pérdidas en el hierro.
 - Las pérdidas en el cobre.
 - Las pérdidas totales.
 - La tensión máxima en el secundario.
- 5.12. Mediante el ensayo en cortocircuito del transformador se obtiene:
- Las pérdidas en el hierro.
 - Las pérdidas en el cobre.
 - Las pérdidas totales.
 - La tensión máxima en el secundario.

Actividades de aplicación

- 5.13. ¿Cuál es la reluctancia del núcleo de una bobina 1400 espiras por la que circula una corriente de 5 A creando un flujo magnético de 14 mWb?
- 5.14. Por una bobina de 25 cm de longitud y 1500 espiras con núcleo al aire circula una corriente de 10 A. Calcula la intensidad de campo magnético y la inducción en el interior del campo magnético.
- 5.15. Una bobina con núcleo al aire de forma toroidal con una longitud de 40 cm y de radio 2 cm está formada por 250 espiras y es recorrida por una corriente de 2,4 amperios. Determina la inducción magnética en el interior del núcleo y el flujo magnético.
- 5.16. Calcula el coeficiente de autoinducción para una bobina de 3600 espiras que es recorrida por una corriente de 8 A, que da lugar a un flujo magnético de 0,2 mWb.
- 5.17. Calcula el coeficiente de autoinducción para un solenoide de 2400 espiras con núcleo al aire con una longitud de 60 cm y un diámetro de 5 cm.
- 5.18. Calcula la reluctancia total del circuito magnético de la figura, así como la fuerza magnetomotriz necesaria para obtener una f_m en el entrehierro de 1,5 T. La permeabilidad relativa es de 5000. Considera una dispersión del flujo magnético en el entrehierro del 10%.
- Los datos referentes a su geometría son: $l_1 = 100$ cm con una sección de $S_1 = 30$ cm². Entrehierro, $l_2 = 0,25$ cm y $S_2 = 30$ cm².



Figura 5.28. Ejercicio de circuito magnético.

- 5.19. Calcula la velocidad de un conductor de 25 cm de longitud que se desplaza perpendicularmente a un campo magnético de inducción 1,5 T para que la f. e. m. sea de 1,8 V.
- 5.20. Calcula la corriente necesaria para que un conductor rectilíneo de 40 cm de longitud y situado perpendicularmente y dentro de un campo magnético de 1,2 T, ejerza una fuerza de 10 N.
- 5.21. Un transformador monofásico consta de 805 espiras en el devanado primario y 350 espiras en el secundario. El primario se conecta a una red alterna de 230 V y 50 Hz y el secundario a una carga por la cual circulan 4,6 A. Calcula considerando el transformador ideal:
- La relación de transformación.
 - La tensión en bornes del secundario.
 - La intensidad que circula por el primario.
 - La potencia aparente que suministra el transformador.