

# Magnetismo y Electromagnetismo

# 10

## Introducción

*El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como las dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinnúmero más de aplicaciones.*

## Contenido

- ▼ Imanes.
- ▼ Campo magnético de un imán.
- ▼ Electromagnetismo.
- ▼ Magnitudes magnéticas.
- ▼ Curva de magnetización.
- ▼ Histéresis magnética.
- ▼ Cálculo de circuitos magnéticos.
- ▼ Electroimanes.

## Objetivos

- ▼ Entender los efectos de los campos magnéticos.
- ▼ Determinar el espectro magnético de un imán.
- ▼ Relacionar las magnitudes fundamentales básicas de un campo magnético con sus unidades de medida y entender su importancia en un circuito magnético.
- ▼ Determinar la relación existente entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos.
- ▼ Determinar el sentido de las líneas de fuerza de un campo electromagnético, así como la intensidad y densidad del mismo.
- ▼ Aprender la importancia de la permeabilidad magnética en la construcción de núcleos para electroimanes.
- ▼ Interpretar la curva de magnetización y el ciclo de histéresis, determinando la saturación magnética, así como las pérdidas originadas en las sustancias magnéticas.
- ▼ Utilizar los electroimanes para aplicaciones prácticas.

## 10.1 Imanes

Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que éste atrae con fuerza sólo aquellos objetos que sean de hierro o de acero. Este fenómeno también se da con el níquel y el cobalto. A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se les conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos**.

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo se pueden utilizar como separadores magnéticos que separan materiales magnéticos de no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

### 10.1.1 Polos de un imán

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto, como el de la Figura 10.1, podremos observar que aparece una mayor concentración de éstas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar cómo esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

Las zonas donde se produce la mayor atracción se denominan polos magnéticos. La zona donde no hay atracción se denomina línea neutra.



Figura 10.1. Polos de un imán.

### 10.1.2 Brújula

Una brújula es una aguja imantada que puede girar libremente en su eje central (Figura 10.2). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, ésta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se le denomina **polo norte**, y al otro **polo sur**.

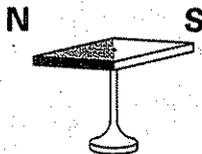


Figura 10.2. Brújula.

Dado que en los imanes los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastará con acercar la brújula a unos de los polos del imán y comprobar si existe atracción o repulsión del polo norte de la misma.

### 10.1.3 Clases de imanes

En la naturaleza se pueden encontrar **imanes naturales**, como la magnetita, que posee ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar dichas propiedades se pueden fabricar **imanes artificiales** a partir de sustancias ferromagnéticas.

A su vez, los imanes artificiales, o sustancias magnetizadas, dependiendo del tipo de sustancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades magnéticas (imanes permanentes) o sólo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (imanes temporales).

Como ejemplo de imanes temporales tenemos el hierro puro, y como imán permanente, el acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar que al acercar un trozo de acero (por ejemplo un destornillador) a un imán, el acero queda magnetizado, apreciándose sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo un clavo de hierro), éste manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales sólo cuando está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto, etc.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

### 10.1.4 Teoría molecular de los imanes

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces, hasta alcanzar lo que vendremos a llamar **molécula magnética**.

Según esta teoría, se puede suponer que un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán (Figura 10.3 a). Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas (Figura 10.3 b).



Figura 10.3. Moléculas magnéticas de un imán (a) y de un trozo de hierro (b).

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos, como la permeabilidad, la saturación magnética, histéresis, etc. que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utiliza-

dos para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno al estado inicial una vez orientadas y magnetizadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura; así, por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769 °C. Por otro lado, si golpeamos fuertemente una trozo de acero imantado se puede modificar su propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

### 10.1.5 Campo magnético de un imán

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así, por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza la siguiente experiencia:

**Experiencia 10.1:** Se toma un imán sobre el que se coloca un lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la misma dibujando la forma del campo magnético (Figura 10.4).

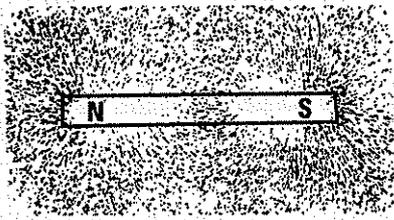


Figura 10.4. Espectro magnético de un imán.

Observa que hay más limaduras concentradas en los extremos, y que existen unas cadenas de limaduras formando unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se las conoce por el nombre de **líneas de fuerza del campo magnético**.

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la Figura 10.5. Las líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es de sur a norte.

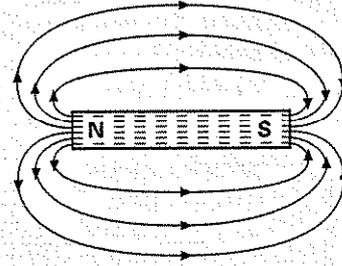


Figura 10.5. Líneas de fuerza del campo magnético.

La visualización de las líneas de campo resulta muy interesante, ya que conociendo su dirección podemos determinar la polaridad del campo magnético. Además, la mayor o menor concentración de las mismas nos indica lo intenso que es el campo en una determinada zona.

En la Figura 10.6 se puede observar que cuando acercamos dos imanes por sus polos iguales, las líneas de campo se repelen.

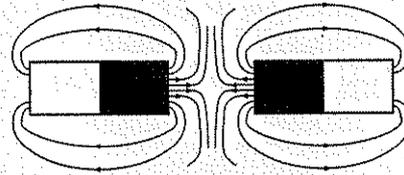


Figura 10.6. Repulsión de dos imanes.

Sin embargo, si acercamos dos imanes por sus polos opuestos (Figura 10.7), las líneas de campo se establecen en la misma dirección y se suman.

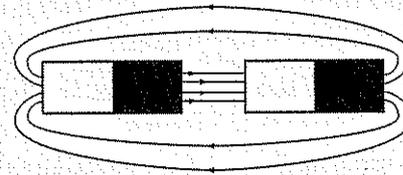


Figura 10.7. Atracción de dos imanes.

## 10.2 Electromagnetismo

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones éste resulta todavía muy débil. Para conseguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que al ser recorridos por una corriente eléctrica desarrollan campos magnéticos, cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

### 10.2.1 Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde

circula una corriente eléctrica (Figura 10.8), observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular (Figura 10.9).

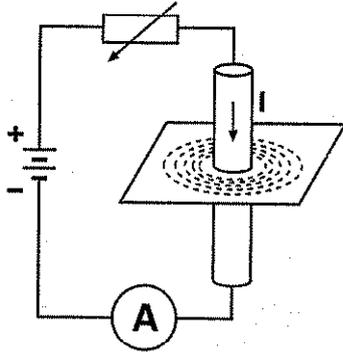


Figura 10.8.

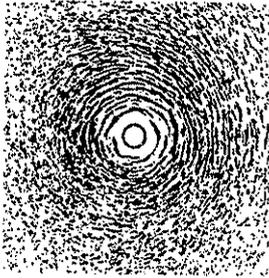


Figura 10.9. Espectro magnético de un conductor.

Esto demuestra que cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar que su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: *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 10.10).

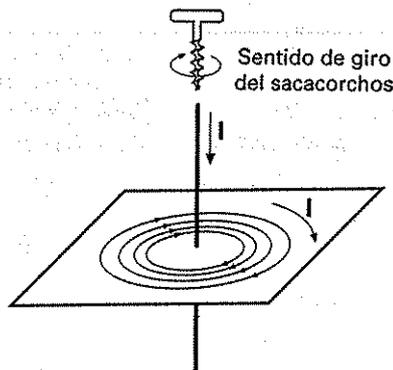


Figura 10.10. Regla del sacacorchos o de Maxwell.

**\*Nota:** Para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A más intensidad de corriente, más intensidad de campo.

## 10.2.2 Campo magnético en un conductor en forma de anillo

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponiendo el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, formando un campo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (Figura 10.11). En la Figura 10.12 se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que, como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

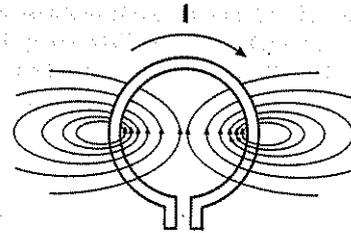


Figura 10.11.

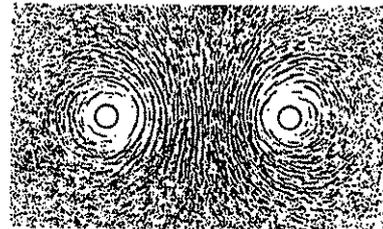


Figura 10.12. Espectro magnético de una espira.

## 10.2.3 Campo magnético formado por una bobina

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose éste en el centro de la misma. El campo resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman polos magnéticos (Figura 10.13).

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma. Basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos

nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, bien fácil es determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza, y el sur por donde entran).

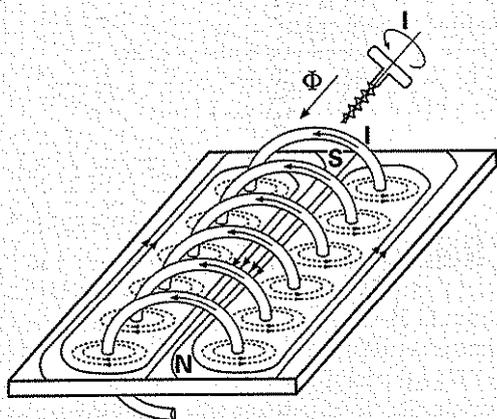


Figura 10.13. Campo magnético de una bobina.

## 10.3 Magnitudes magnéticas

Al igual que para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

### 10.3.1 Flujo magnético ( $\Phi$ )

El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. La cantidad de estas líneas se le denomina flujo magnético.

Se representa por la letra griega  $\Phi$ ; sus unidades son:

- El weber (Wb), en el sistema internacional.
- El maxvelio, en el sistema cgs (Mx).

La relación que existe entre ambas unidades es  $1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$ .

### 10.3.2 Inducción magnética (B)

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético.

Se representa por la letra griega B; sus unidades son:

- La tesla (T), en el sistema internacional.
- El gaus (Gs), en el sistema cgs.

La relación que existe entre ambas unidades es  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$ .

Se dice que existe una inducción de una tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2}$$

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

#### Ejemplo: 10.1

¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de  $30 \text{ cm}^2$  de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de  $0,009 \text{ Wb}$ ? Expresar el resultado en teslas.

$$\text{Solución: } B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,009}{0,003} = 3 \text{ T}$$

$$30 \text{ cm}^2 = 30 / 10.000 = 0,003 \text{ m}^2$$

#### Ejemplo: 10.2

¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina si ésta tiene un núcleo de  $20 \text{ cm}^2$  de superficie y la inducción magnética en la misma es de  $1,5 \text{ teslas}$ ?

Solución: Despejando de la fórmula general:

$$\Phi = B \cdot S = 1,5 \cdot 0,002 = 0,003 \text{ Wb} = 3 \text{ mWb (miliweber)}$$

### 10.3.3 Fuerza magnetomotriz ( $\mathcal{F}$ )

Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de la misma.

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

$\mathcal{F}$  = Fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta (Av)

N = Número de espiras

I = Intensidad de corriente (A)

#### Ejemplo: 10.3

Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de  $500 \text{ Av}$ . Indicar dos posibilidades de conseguirlo.

Solución: Si fabricamos una bobina con  $500$  espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$$\mathcal{F} = N \cdot I, \text{ despejando } I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1 \text{ A}$$

$$\text{¿y si la fabricamos con 100 espiras? } I = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como por ejemplo los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorraíl, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potentísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por el efecto Joule por carecer éstos de resistencia eléctrica.

### 10.3.4 Intensidad de campo magnético (H)

Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ( $N \cdot I$ ). Ahora bien, cuanto más larga sea la bobina, más se dispersan las líneas de campo, dando como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

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

$H$  = Intensidad del campo en amperio-vuelta/metro (Av/m)

$N$  = N° de vueltas de la bobina

$I$  = Intensidad de la corriente (A)

$L$  = Longitud de la bobina (m)

#### Ejemplo: 10.4

Calcular la intensidad del campo en el interior de la bobina de la Figura 10.14. El número de espiras de la misma es de 300 y la corriente 10 A.

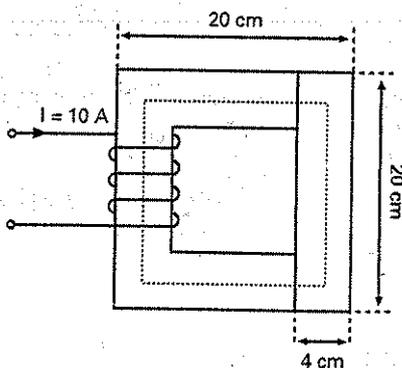


Figura 10.14

*Solución:* Primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N I}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0,64} = 4.687,5 \text{ Av/m}$$

### 10.3.5 Reluctancia ( $\mathcal{R}$ )

La reluctancia de un material nos indica si éste deja establecer las líneas de fuerza en mayor o menor grado. Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada. En cierta forma la reluctancia es un concepto similar al de resistencia en un circuito eléctrico, hasta tal punto que podemos establecer una ley de Ohm para los circuitos magnéticos el flujo que se establece en un circuito magnético es proporcional a la fuerza magnetomotriz proporcionada por la bobina e inversamente proporcional a la reluctancia del medio por donde se establecen las líneas de fuerza del campo magnético:

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

Esta expresión también se conoce por ley de Hopkinson

La reluctancia es una característica propia de cada material magnético, y de la ley de Hopkinson se deduce que:

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

Las unidades que le corresponden son: Av/Wb

#### Ejemplo 10.5

Calcular la reluctancia que posee el núcleo de un electroimán si al hacer circular 5 A por la bobina de 1.000 espiras se ha establecido un flujo magnético de 5 mWb.

*Solución:* La fuerza magnetomotriz de la bobina del electroimán es:

$$\mathcal{F} = N I = 1.000 \cdot 5 = 5.000 \text{ Av}$$

Si se establecen en el núcleo de hierro 5 mWb significa que su reluctancia es:

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{5.000}{0,005} = 1.000.000 \text{ Av/Wb}$$

## 10.4 Curva de magnetización. Saturación magnética

Cuando se somete una sustancia a la acción de un campo magnético creciente  $H$ , la inducción magnética que aparece en la misma también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación ( $B$ - $H$ ) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material.

En la curva de la Figura 10.15 se ha representado la relación  $B$ - $H$  de un hierro dulce. En ella se puede apreciar que para valores de intensidad de campo de hasta 2000 Av/m (tramo a-b), la inducción magnética crece proporcionalmente hasta 0,2 T. A partir de este punto aparece un punto de inflexión en la curva, y a aumentos de la intensidad de campo le corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto se dice que el hierro ha alcanzado la saturación magnética.

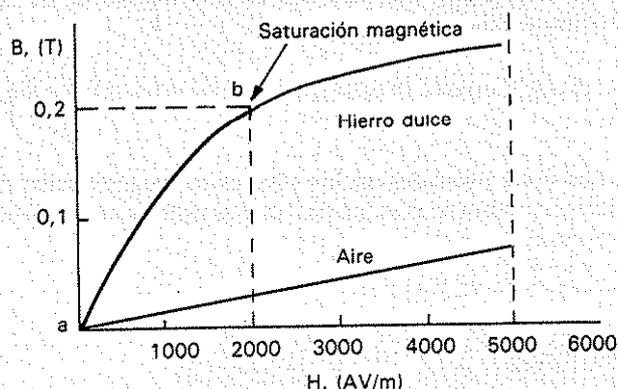


Figura 10.15. Curva de magnetización.

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: cuando se introduce en una bobina un núcleo de una sustancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad  $H$ , que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha sustancia; lo que refuerza el campo con una inducción  $B$ . Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de  $H$ ; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, y con ella  $H$ , llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas, y por mucho que se aumente la intensidad del campo, éste ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

En la Figura 10.15 también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad de campo de la bobina.

## 10.5 Permeabilidad magnética

Se puede comprobar experimentalmente que al introducir en el núcleo de una bobina una barra de hierro, se aprecia un

notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseemos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una sustancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos  $B_0$  a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire, y  $B$  a la inducción magnética conseguida al introducir una sustancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

$\mu_r$  es el poder que posee la sustancia ferromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se le conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la permeabilidad relativa con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: la bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, éste se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original.

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de permeabilidad absoluta ( $\mu$ ). Ésta nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina ( $H$ ) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una sustancia ferromagnética en el núcleo.

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

O lo que es lo mismo:  $B = \mu \cdot H$ , donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el SI se dan en Henrios/metro (H/m).

Cada sustancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas sustancias. Como ya estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante, y depende sobre todo de los niveles de inducción a que se someta a los mismos.

La permeabilidad del aire o el vacío en el S.I. es:

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

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

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

### Ejemplo: 10.6

Determinar la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán si se ha

medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son:  $N = 500$  espiras;  $I = 15$  A; longitud media del núcleo = 30 cm; superficie recta del núcleo = 25 cm<sup>2</sup>.

*Solución:* Primero calculamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,005}{0,0025} = 2 \text{ T}$$

La intensidad de campo en la bobina es:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0,3} = 25.000 \text{ Av/m}$$

La permeabilidad absoluta es entonces:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0,00008 \text{ H/m}$$

La permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo son 64 veces mayor con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

### Ejemplo: 10.7

Una bobina posee 300 espiras, una longitud de 24 cm y está bobinada sobre un cilindro de 35 cm<sup>2</sup> de sección. Determinar la inducción (el flujo magnético alcanzado) si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 20 A.

*Solución:* Primero determinamos la intensidad del campo magnético generado por la bobina:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 20}{0,24} = 25.000 \text{ Av/m}$$

Aplicando el concepto de permeabilidad absoluta, tendremos que el nivel de inducción alcanzado con un núcleo de aire es:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25.000 = 0,03 \text{ T}$$

El flujo magnético para una sección transversal de la bobina de 35 cm<sup>2</sup> es:

$$\Phi = B S = 0,03 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 0,105 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0,105 \text{ mWb}$$

Los datos obtenidos en los ensayos de magnetización de diferentes substancias se pueden reflejar también en una Tabla como la 10.1.

B (T)	H (Av/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	360	350
1,1	650	675	530
1,3	1000	1200	1300
1,5	2400	2200	5000
1,6	5300	3500	9000
1,7	7000	6000	15500
1,8	11000	10000	27500
1,9	17000	16000	
2	27000	32000	

Tabla 10.1. Relación entre H y B para diferentes niveles de inducción de varias substancias ferromagnéticas.

Con la ayuda de los datos de la Tabla 10.1 es posible comprobar que la permeabilidad de un material no es constante. Tomemos, por ejemplo, la chapa de silicio y calculemos la permeabilidad para los siguientes niveles de inducción: a) 0,7 T; b) 1,3 T, y c) 1,8 T.

$$a) \mu = \frac{B}{H} = \frac{0,7}{240} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$$

$$b) \mu = \dots = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}, \quad c) \mu = \dots = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ H/m}$$

En conclusión, la permeabilidad se hace más pequeña según nos acercamos a los niveles de saturación magnética.

## 10.6 Histéresis magnética

El estudio de la histéresis tiene una gran importancia en los materiales magnéticos, ya que este fenómeno produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos alternos. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, etc.

La palabra histéresis significa remanencia. Después de someter a una substancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando éste desaparece, la substancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que recibe el nombre de **magnetismo remanente**.

En la Figura 10.16 se muestra el aspecto de la curva de magnetización de una substancia ferromagnética cuando es sometida a intensidades de campo magnético alternos.

En el punto 0 la substancia no ha sido magnetizada nunca, en consecuencia, la inducción magnética es nula.

En el tramo (0-a) se va aumentando la intensidad de campo H, con lo que se consiguen valores crecientes de inducción hasta llegar a la saturación.

En el tramo (a-b) se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce, pero no en la misma proporción que antes. En el punto (b) se ha anulado la intensidad de campo, sin embargo, la substancia manifiesta todavía un cierto magnetismo remanente ( $B_r$ ).

En el tramo (b-c) se invierte el sentido del campo magnético (esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente eléctrica que alimenta la bobina del ensayo). En el punto (c) la inducción es cero; se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello, ha habido que aplicar una intensidad de campo ( $H_c$ ), conocida por el nombre de **campo coercitivo**.

En el tramo (c-d) se sigue aplicando una intensidad de campo negativo, con lo que se consiguen niveles de inducción negativos hasta alcanzar la saturación.

En los tramos (d-e), (e-f) y (f-a) se completa el ciclo de histéresis. La curva no pasa otra vez por el punto (0) debido a la histéresis.

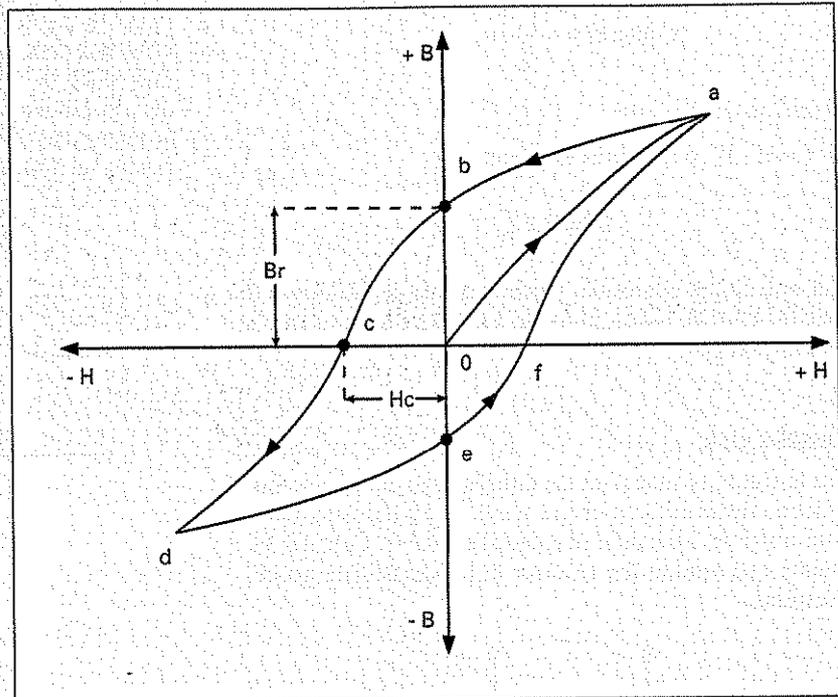


Figura 10.16. Ciclo de histéresis.

Las pérdidas que se originan en los materiales ferromagnéticos debido a la histéresis son proporcionales al área del ciclo. Si nos fijamos en el ciclo, este área aumenta en gran manera cuando el campo coercitivo  $H_c$  es grande. Por esta razón, cuando se eligen materiales ferromagnéticos para la construcción de aparatos que van a funcionar con corriente alterna, se procura que posean un campo coercitivo lo más pequeño posible.

Sin embargo, para la fabricación de imanes permanentes se eligen materiales que posean un campo coercitivo lo más grande posible.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos producidos por corrientes alternas aumentan con la frecuencia (cuantos más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá).

También la histéresis se puede explicar mediante la teoría molecular de los imanes: al someter a un trozo de hierro a un campo alterno, las moléculas magnéticas se ven forzadas a girar en uno y otro sentido, produciéndose una especie de rozamiento molecular que produce calor. Este calor es más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición.

## 10.7 Cálculo de circuitos magnéticos

Se puede decir que un circuito magnético es por donde se establecen las líneas de campo. Para determinar la fuerza magnetomotriz (los amperios-vuelta) que debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de inducción magnética se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Como } H = \frac{N \cdot I}{L},$$

de aquí se deduce que:

$$N \cdot I = H \cdot L, \text{ o lo que es lo mismo:}$$

$$\mathcal{F} = H \cdot L$$

Con esta última expresión, y con la ayuda de las curvas de magnetización o de tablas, como la 10.1 ya podemos resolver algunas cuestiones.

**Ejemplo: 10.8**

En la figura se muestran las dimensiones de un circuito magnético fabricado con chapa al silicio. Se necesita obtener un nivel de inducción magnética de 1,3 T. Calcular la corriente que tendrá que recorrer la bobina si ésta posee 750 espiras.

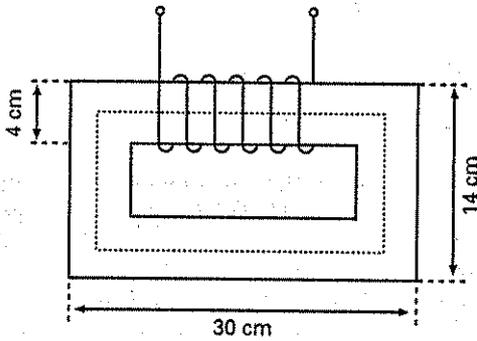


Figura 10.17

**Solución:** Consultando la Tabla 10.1 tenemos que para conseguir una inducción de 1,3 T en chapa al silicio se necesita una intensidad de campo igual a  $H = 1.300 \text{ Av}$ .

Según se desprende de la Figura 10.17 la longitud media de las líneas de campo, es:

$$L = 26 + 10 + 26 + 10 = 72 \text{ cm} = 0,72 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria será entonces:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 1.300 \cdot 0,72 = 936 \text{ Av}$$

La intensidad de la corriente:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{936}{750} = 1,25 \text{ A}$$

En el caso de que el circuito magnético esté compuesto por diferentes partes, se suman las fuerzas magnetomotrices de cada una de las diferentes partes del circuito magnético.

**Ejemplo: 10.9**

El circuito magnético de la Figura 10.18 está fabricado con hierro forjado. Se desea obtener en el entrehierro

(espacio sin hierro, donde las líneas de campo se tienen que establecer con gran dificultad por el aire) una inducción magnética de 0,9 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar la intensidad de corriente que habrá que proporcionar a la bobina de 500 espiras.

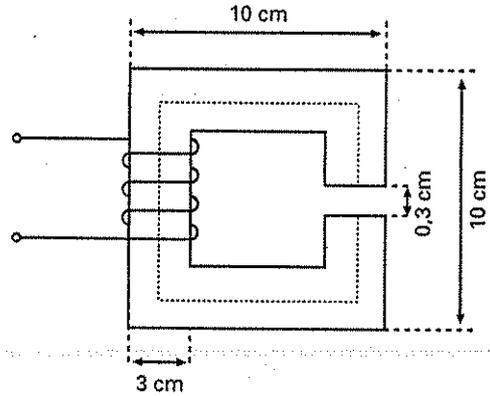


Figura 10.18

**Solución:** La intensidad de campo necesaria para conseguir una inducción de 0,9 T en la parte del circuito magnético formado por el hierro forjado es, según la Tabla 10.1, de 400 Av/m.

La longitud media del circuito formado por hierro, es:

$$L_{Fe} = 7 + 7 + 7 + 6,7 = 27,7 \text{ cm} = 0,277 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz que necesita el hierro, es:

$$\mathcal{F}_{Fe} = H_{Fe} \cdot L_{Fe} = 400 \cdot 0,277 = 111 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire o entrehierro la calculamos aplicando el concepto de permeabilidad y recordando que la permeabilidad del aire es  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ .

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716.197 \text{ Av/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud en el entrehierro es 0,3 cm (0,003 m), la fuerza magnetomotriz que necesita este tramo del circuito magnético es:

$$\mathcal{F}_{aire} = H \cdot L = 716.197 \cdot 0,003 = 2.149 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para todo el circuito magnético será, por tanto:

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_{Fe} + \mathcal{F}_{aire} = 111 + 2.149 = 2.260 \text{ Av}$$

La intensidad de la bobina de 500 espiras, es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{2.260}{500} = 4,52 \text{ A}$$

## 10.8 Electroimanes

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina, que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica, y se desimanta en el momento que interrumpimos esta corriente (Figura 10.19).

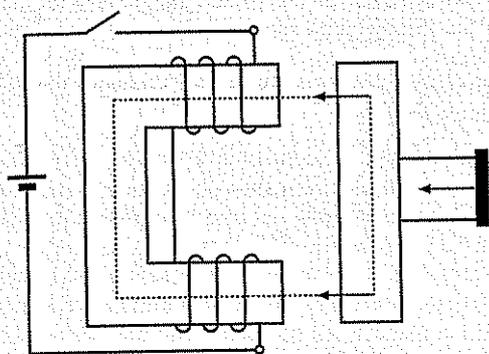


Figura 10.19

La fuerza con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

$$F = 40.000 B^2 \cdot S$$

$F$  = Fuerza de atracción en Kp

$B$  = Inducción en el núcleo en T

$S$  = Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en  $m^2$

### Ejemplo: 10.10

Determinar la fuerza con la que atraerá el electroimán de la Figura 10.20 a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,5 T.

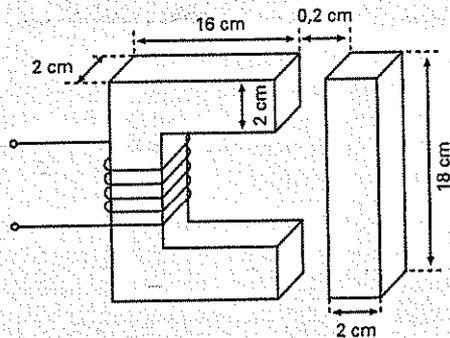


Figura 10.20

**Solución:**

La superficie de atracción de uno de los polos, es:

$$S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ cm}^2$$

Como vamos a calcular la fuerza de atracción de los dos polos, la superficie será entonces:

$$S = 2 \cdot 4 = 8 \text{ cm}^2 = 0,0008 \text{ m}^2$$

La fuerza de atracción del electroimán, es:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S = 40.000 \cdot 1,5^2 \cdot 0,0008 = 72 \text{ Kp}$$

### Ejemplo: 10.11

Se desea conseguir que el electroimán de la Figura 10.20 desarrolle una fuerza de atracción de 2,88 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado y que la bobina posee 344 espiras, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

**Solución:** Determinaremos primero la inducción magnética que se tiene que dar en el entrehierro:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S, \text{ despejando:}$$

$$B = \sqrt{\frac{F}{40.000 \cdot S}} = \sqrt{\frac{2,88}{40.000 \cdot 0,0008}} = 0,3 \text{ T}$$

Consultando en la Tabla 10.1, tenemos que para conseguir 0,3 T en chapa normal necesitamos aplicar una intensidad de campo igual a 120 Av/m.

La longitud media del núcleo de chapa es:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para chapa es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 120 \cdot 0,64 = 77 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire es:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238.732 \text{ Av/m}$$

La longitud media del entrehierro es:

$$L = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ cm} = 0,004 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para el entrehierro es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 238.732 \cdot 0,004 = 955 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz para todo el circuito es:

$$\mathcal{F} = 77 + 955 = 1.032 \text{ Av}$$

Dado que la bobina es de 344 espiras, la intensidad con la que habrá que alimentarla es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{1.032}{344} = 3 \text{ A}$$

## 10.8.1 Aplicaciones prácticas de los electroimanes

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes, éstos pueden ser de culata (Figura 10.21) o de núcleo móvil (Figura 10.22). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma, que sólo se imanta cuando las bobinas están siendo recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos a la bobina con corriente eléctrica.

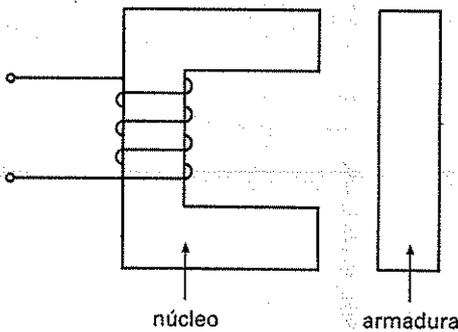


Figura 10.21. Electroimán de culata.

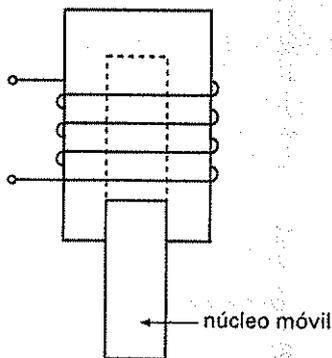


Figura 10.22. Electroimán de núcleo móvil.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

**Frenos magnéticos:** Se aplican sobre todo en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.

**Electroválvulas:** La válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporado. La aplicación de las electroválvulas está muy extendida en todo tipo de aplicaciones

industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia.

Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión de agua.

**Timbres.** Los timbres se utilizan para producir señales acústicas.

Sistemas que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos: Se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.

**Relés y contactores:** El contactor se podría definir como un interruptor de múltiples contactos que se puede accionar a distancia. El funcionamiento de este dispositivo es como sigue (Figura 10.23). Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.

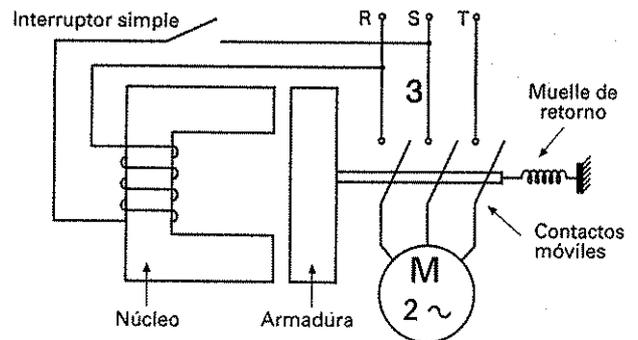


Figura 10.23. Contactor accionando un motor eléctrico trifásico.

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo es muy pequeña en relación a la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor.

En la actualidad se investiga en la creación de nuevos materiales ferromagnéticos por diferentes procedimientos de laboratorio con el objeto de darles a éstos ciertas características que los hagan útiles para el desarrollo de aplicaciones especiales. Como por ejemplo:

- Conductores eléctricos que poseen una propiedad conocida como "magnetorresistencia". Es decir, materiales en los que la resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a la acción de un campo magnético. Esto puede tener aplicaciones como, por ejemplo, elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc.

- Etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en grandes almacenes.

## Actividades

1. Consigue los materiales necesarios para la observación del espectro magnético de imanes e electroimanes, así como la comprobación de las propiedades magnéticas más significativas (atracción y repulsión entre imanes, polaridad de los campos magnéticos generados por conductores y bobinas, etc). Comprueba también cómo se multiplican las líneas de campo al introducir en una bobina con núcleo de aire una sustancia ferromagnética.
2. Consigue diferentes dispositivos que funcionen gracias al electromagnetismo, como por ejemplo, un contactor, una electroválvula, un timbre, un interruptor automático, etc. Analiza las partes que los constituyen e intenta comprobar y explicar su funcionamiento.
3. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

## Autoevaluación

- 1) ¿Qué es lo que puede causar la pérdida de las propiedades magnéticas en un imán permanente?
  - a)  Corrientes eléctricas elevadas
  - b)  Golpes y excesos de la temperatura
  - c)  Disminución de la temperatura
- 2) ¿Cómo se consigue aumentar el nivel de inducción magnética en una bobina con núcleo de aire?
  - a)  Introduciendo una sustancia ferromagnética en el núcleo
  - b)  Sólo es posible aumentar la inducción magnética aumentando la intensidad por la bobina
- 3) ¿Cómo es la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos?
  - a)  Es un valor constante
  - b)  Depende de la inducción magnética alcanzada por los materiales
- 4) Para la construcción de núcleos de electroimanes, transformadores y motores empleamos preferentemente:
  - a)  Acero
  - b)  Hierro
- 5) Si un material ferromagnético posee una permeabilidad relativa de 100, calcular su permeabilidad absoluta.
- 6) Un circuito magnético con núcleo de hierro forjado posee una longitud de 10 cm y una sección transversal de 3 cm<sup>2</sup>. La bobina tiene 100 espiras y es alimentada por una corriente de 1 A. Con la ayuda de la Tabla 10.1, averiguar:  $H$ ,  $B$ ,  $\Phi$ ,  $\mu$ ,  $\mathcal{R}$  y  $\mathcal{F}$ .
- 7) Un núcleo de acero con una inducción de 1,2 T posee una permeabilidad de  $4 \cdot 10^{-3}$  H/m. La longitud de la bobina es de 25 cm y la superficie recta del núcleo es de 5 cm<sup>2</sup>. Calcular el flujo magnético, la intensidad de campo y la fuerza magnetomotriz.
- 8) El núcleo rectangular de la Figura 10.24 es de chapa al silicio con una sección transversal de 25 cm<sup>2</sup>. La bobina

na posee 500 espiras y es atravesada por una corriente de 10 A. Con la ayuda de los datos presentados en su correspondiente curva de magnetización (Tabla 10.1), determinar  $B$ ,  $\Phi$  y  $\mathcal{F}$ .

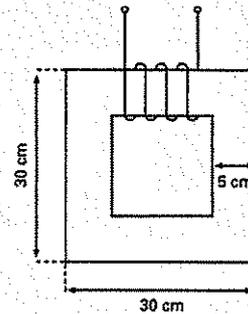


Figura 10.24

- 9) ¿Cuántos amperios habrá que hacer pasar por la bobina del Ejercicio 10.8 para que exista un flujo magnético de 4 mWb?
- 10) El circuito magnético de la Figura 10.25 está fabricado con chapa magnética normal. Se desea obtener en el entrehierro una inducción magnética de 1,1 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar el número de espiras con la que habrá que fabricar la bobina si se quiere suministrar una corriente de 2 A.

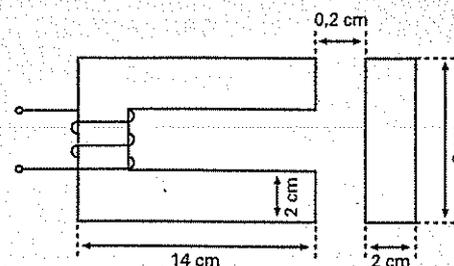


Figura 10.25

- 11) Determinar la fuerza con la que atraerá un electroimán a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de  $1,3 \text{ T}$  y la superficie total de contacto entre el núcleo y el hierro móvil es de  $4 \text{ cm}^2$ .
- 12) Se desea conseguir que el electroimán de un contactor desarrolle una fuerza de atracción al bloque de contactos móviles de  $2 \text{ Kp}$ . Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado, que la bobina posee  $1.000$  espiras y que las dimensiones y forma del circuito magnético de dicho electroimán son las que se muestran en la Figura 10.26, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

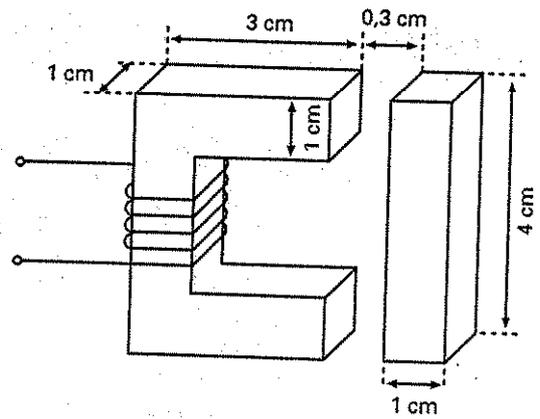


Figura 10.26