

### Propiedades magnéticas de la materia



- 8.1 Magnetismo de la materia. Vector imantación. Permeabilidad magnética
- 8.2 Diamagnetismo
- 8.3 Paramagnetismo
- 8.4 Ferromagnetismo. Ciclo de histéresis. Modelo de Weiss o de los dominios.

#### Objetivos

- Clasificar los materiales en función de sus propiedades magnéticas
- Conocer las características principales de los materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos
- Explicar el ferromagnetismo mediante la teoría de los dominios o de Weiss.

#### 8.1 Magnetismo en la materia. Vector imantación. Permeabilidad magnética

La materia está constituida por átomos en los que los electrones están en movimiento. Utilizando un modelo atómico sencillo, las órbitas electrónicas alrededor del núcleo de un átomo pueden considerarse, como corrientes eléctricas circulares alrededor del núcleo y, por lo tanto, equivalentes a espiras de corriente. Así, un electrón girando en una órbita circular de radio  $r$  con un periodo  $T$  y una velocidad  $v$ , puede considerarse equivalente a una espira circular de corriente del mismo radio y recorrida por una intensidad  $I = e/T$  que tendrá un momento magnético,

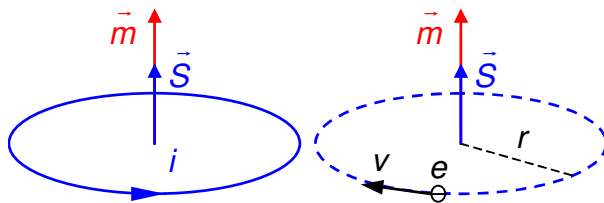


Figura 8-1. El movimiento electrónico es equivalente a una corriente circular

$$\vec{m} = I\vec{S} = \frac{e}{T} \pi r^2 \vec{u} = \frac{e}{2\pi r/v} \pi r^2 \vec{u} = \frac{evr}{2} \vec{u}$$

Donde  $\vec{u}$  es un vector unitario en la dirección del vector superficie. De este modo, se modelizan los movimientos electrónicos como si se tratara de espiras de corriente, y por consiguiente se estaría

considerando la materia constituida por una gran cantidad de dipolos magnéticos. Además del momento magnético asociado al movimiento de los electrones, hay que añadir el momento magnético intrínseco del electrón asociado a su espín.

En la electrostática también nos encontramos en los dieléctricos con la existencia de dipolos eléctricos y fenómenos de polarización, cuyo efecto consistía en disminuir el campo eléctrico dentro del material cuando éste era sometido a un campo eléctrico externo.

En el magnetismo, aunque pueda pensarse que la situación es similar, el problema es más complejo, pues el momento magnético de un átomo depende de diversos factores como el número de electrones del átomo, de si las capas electrónicas están o no completas, del momento magnético de espín de los electrones desapareados del átomo, de la estructura electrónica del átomo en definitiva. Algunos de estos comportamientos no son fáciles de analizar con conceptos de física clásica, necesiándose en algunas ocasiones de conceptos basados en la física cuántica.

Por lo tanto, algunas sustancias pueden poseer un momento magnético propio producido por los momentos magnéticos atómicos. Estos momentos magnéticos atómicos, caso de existir, están en principio orientados al azar en todas direcciones, motivo por el cual la mayor parte de materiales no presentan magnetización.

La magnitud que se utiliza para cuantificar el estado de los momentos magnéticos en una región, se denomina **imantación**  $\vec{M}$ , magnitud vectorial, que se define en un punto como el momento magnético por unidad de volumen:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}, \text{ y se mide en } \text{Am}^{-1}$$

Por lo tanto, se dice que un material no está imantado (o magnetizado) si la suma de los momentos magnéticos en un volumen dado es nulo.

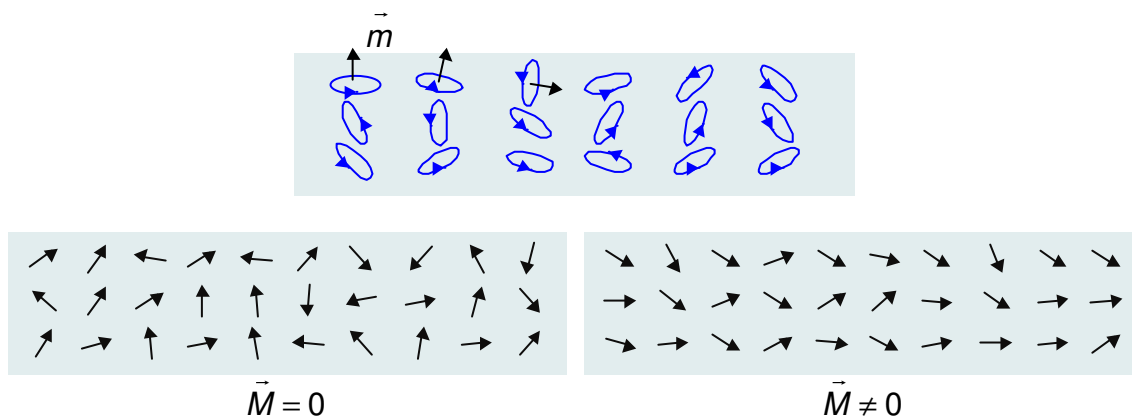


Figura 8-2. La imantación en un material es la suma de los momentos magnéticos por unidad de volumen

Las diversas sustancias no presentan la misma respuesta al situarlas en un campo magnético. Según el comportamiento frente a un campo magnético externo, se clasifican en tres tipos: diamagnéticas, paramagnéticas, y ferromagnéticas.

Si se aplica a un material un campo magnético  $B_{ap}$  (campo aplicado), los momentos magnéticos atómicos, y por tanto la imantación, van a variar. El fenómeno es fácil de entender recurriendo a un símil con brújulas: al acercar un imán a un conjunto de brújulas orientadas al azar (fuera de la Tierra), éstas tienden a orientarse en la dirección del campo aplicado. Por tanto, la imantación del material va a variar. En los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, la imantación es directamente proporcional al campo magnético aplicado.

$$\vec{M} = \chi_m \frac{\vec{B}_{ap}}{\mu_0}$$

donde  $\chi_m$  se denomina **susceptibilidad magnética**, y es un número sin dimensiones característico de cada material. A  $1 + \chi_m$  se le denomina permeabilidad magnética relativa  $\mu_r$ , y también es adimensional.

Material	$\chi_m$ a 20 °C
Aluminio	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Cobre	$-0,98 \cdot 10^{-5}$
Diamante	$-2,2 \cdot 10^{-5}$
Oro	$-3,6 \cdot 10^{-5}$
Mercurio	$-3,2 \cdot 10^{-5}$
Plata	$-2,6 \cdot 10^{-5}$
Sodio	$-0,24 \cdot 10^{-5}$
Titanio	$7,06 \cdot 10^{-5}$
Volframio	$6,8 \cdot 10^{-5}$
Oxígeno (a 1 atm)	$2100 \cdot 10^{-9}$

Tabla 8-1. Susceptibilidades magnéticas de algunas sustancias

Sustancia	$\mu_r$	Sustancia	$\mu_r$
Vacío	1	Bismuto	0,99983
Aire	1,00000036	Mercurio	0,999968
Aluminio	1,000021	Oro	0,999964
Wolframio	1,000068	Plata	0,99998
Paladio	1,00082	Plomo	0,999983
Cobalto	250	Cobre	0,999991
Níquel	600	Agua	0,999991
Hierro comercial	6000		
Hierro alta pureza	$2 \cdot 10^5$		
Supermalloy	$10^6$		
(79% Ni, 5 % Mo)			

Tabla 8-2. Permeabilidad magnética de diversas sustancias. A la izquierda las sustancias paramagnéticas y ferromagnéticas. A la derecha las diamagnéticas

## 8.2 Diamagnetismo

En la Tabla 8-1 se observa que  $\chi_m$  es un número muy pequeño. En algunos materiales la susceptibilidad magnética es negativa, lo que significa que al someterles a un campo magnético externo, el campo magnético dentro del material disminuye. Este comportamiento se denomina diamagnetismo.

Las sustancias diamagnéticas no poseen momentos magnéticos atómicos permanentes, pues sus átomos poseen estructuras electrónicas de capas completas con sus electrones apareados, cancelándose de este modo los momentos magnéticos electrónicos. Sin embargo, ante un campo magnético externo, se distorsiona el movimiento electrónico, formándose momentos magnéticos inducidos de sentido contrario al campo aplicado, debilitando así el campo magnético dentro del material.

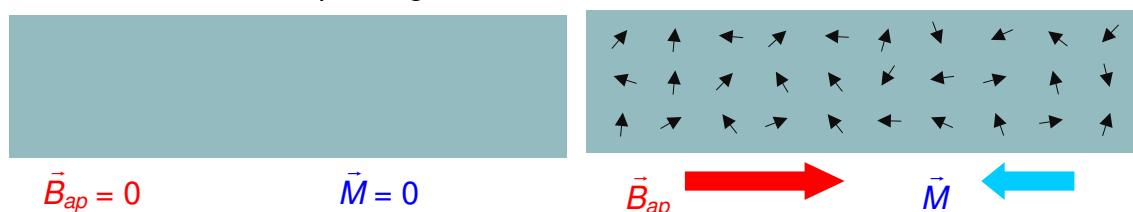


Figura 8-3. En las sustancias diamagnéticas, se forman dipolos magnéticos inducidos cuyo efecto consiste en disminuir el campo magnético dentro del material

El comportamiento diamagnético es general a todas las sustancias, aunque sus efectos, por ser muy débiles, son apenas perceptibles, siendo además enmascarado en algunas ocasiones por otros efectos, como el paramagnetismo y sobre todo el ferromagnetismo.

## 8.3 Paramagnetismo

En otras sustancias, en cambio, la susceptibilidad magnética es positiva, lo que significa que la imantación tiene el mismo sentido que el campo aplicado. A estas sustancias se les denomina paramagnéticas. En ellas existe un ligero acoplamiento de los dipolos magnéticos permanentes que son del orden de 1000 veces mayores que los producidos por el comportamiento diamagnético, por lo que éste queda enmascarado.

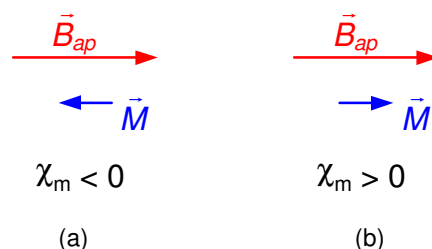


Figura 8-4. Sustancias diamagnéticas (a) y paramagnéticas (b)

Al aplicar un campo externo, los dipolos magnéticos, que estaban orientados al azar como consecuencia de la agitación térmica, se acoplan ligeramente alineándose en la dirección del campo aplicado, aumentando de este modo el campo magnético dentro del material. El efecto, sin embargo, es débil, aunque suficiente para enmascarar el efecto diamagnético que se presenta en todas las sustancias.

En los materiales paramagnéticos, la imantación depende de la temperatura: a temperaturas muy bajas es más fácil alinear los momentos magnéticos. Al aumentar la temperatura la agitación térmica tiende a borrar cualquier acoplamiento que se produzca entre los dipolos magnéticos, y de este modo la imantación es más difícil y la susceptibilidad magnética disminuye.

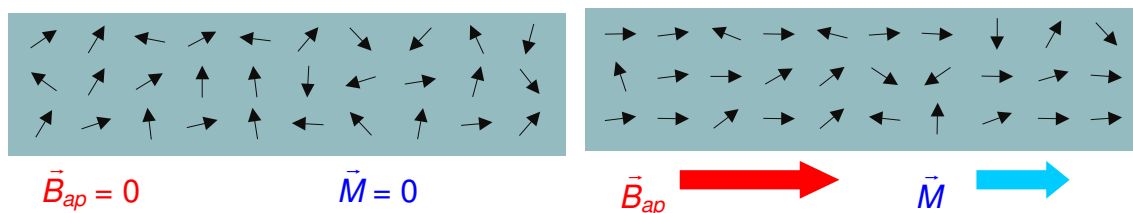


Figura 8-5. Al aplicar un campo magnético a una sustancia paramagnética los dipolos magnéticos permanentes se acoplan ligeramente, aumentando el campo magnético dentro del material

#### 8.4 Ferromagnetismo. Modelo de los dominios de Weiss. Ciclo de histéresis

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por unos valores de la susceptibilidad magnética positivos y muy altos, y que además dependen de la historia magnética del material, de los campos magnéticos a que haya sido sometido. Sustancias ferromagnéticas son el hierro, cobalto, níquel y algunas aleaciones. El motivo de este comportamiento singular está relacionado con las fuertes interacciones entre espines de pares de electrones. Sin embargo, no podemos profundizar mucho más, pues la explicación de este comportamiento no es simple, y no es fácil explicar con conceptos de física clásica argumentos que sólo se explican con ayuda de la física cuántica.

En estas sustancias los momentos magnéticos atómicos se acoplan sin necesidad de campo magnético externo, formando grandes regiones con orientación paralela de los espines electrónicos, y por lo tanto con los momentos magnéticos paralelos. A estas regiones se les denomina **dominios magnéticos**. El tamaño de estos dominios es microscópico (del orden de  $10^{-6}$  m), aunque pueden crecer o decrecer, y su orientación espacial depende de la disposición espacial de los átomos en la red cristalina. Fueron descubiertos por Pierre Weiss en 1907.

Las fronteras entre los dominios se denominan paredes de Bloch, en las cuales se produce la transición en la orientación de los dipolos.

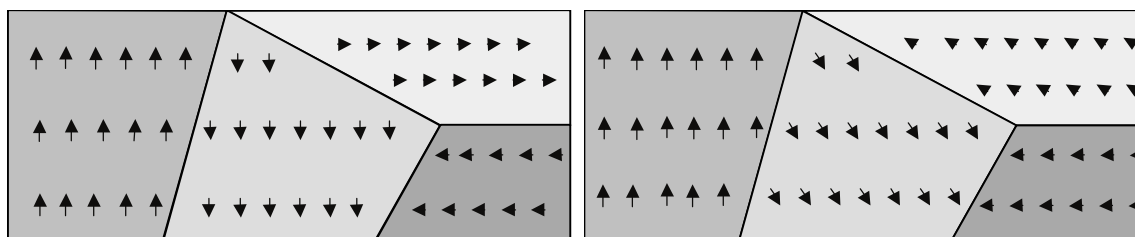


Figura 8-6. Esquema de los dominios magnéticos en un cristal cúbico y en un cristal hexagonal, con dos y tres direcciones de orientación.

**Modelo de los dominios de Weiss.** La imantación de un material ferromagnético puede explicarse con ayuda del modelo de los dominios magnéticos. Un material no imantado parte de la situación a) de la Figura 8-7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los dominios magnéticos están orientados al azar en ausencia de campo externo. Al

aumentar éste en una dirección determinada en b), estamos haciendo que aquellos dominios que tengan una componente de su vector imantación en el mismo sentido que  $B_{ap}$  crezcan en detrimento de otros. De esta manera, crecen unos dominios (los de imantación favorable) y se reducen otros. La situación continúa en c) con el aumento de  $B_{ap}$  hasta que los dominios favorecidos no pueden aumentar de tamaño, y finalmente en d) los momentos magnéticos de los dominios favorecidos por el campo girarán hasta coincidir con la dirección del campo y llegar a la imantación de saturación. Aunque aumentemos el campo aplicado, la imantación no aumentará. Esta última etapa de orientación de momentos fuera de las direcciones de orientación de los dominios es reversible, y desaparece al eliminar el campo, mientras que el crecimiento de los dominios favorecidos a expensas de los no favorecidos se mantendrá y será responsable de la imantación remanente del material relacionada con el fenómeno de histéresis.

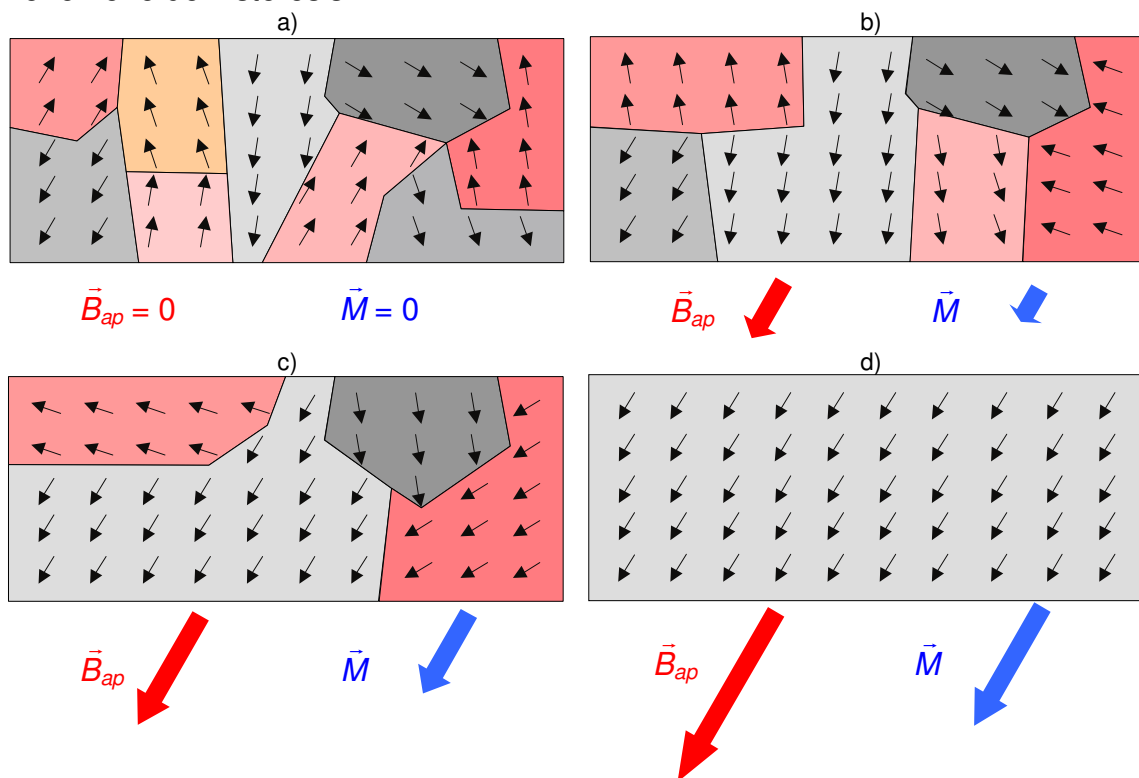


Figura 8-7. Cuatro etapas de crecimiento de los dominios magnéticos

Barkhausen, en 1919, por medio de amplificadores electrónicos comprobó que se podían escuchar "clicks" cuando el aumento del campo  $B$  externo lleva a los dominios de Weiss a alinearse.

Al igual que en el paramagnetismo, la temperatura tiende a aumentar la agitación térmica, y por lo tanto a hacer desaparecer el ferromagnetismo. Para cada sustancia ferromagnética, existe una temperatura denominada **temperatura de Curie**, por encima de la cual la sustancia se vuelve paramagnética (770 °C para el hierro) como consecuencia de que la agitación térmica contrarresta las fuerzas de interacción entre espines electrónicos.

Al aplicar un campo magnético externo a estas sustancias, la imantación no sólo crece, sino que el campo en el interior del material es incluso miles de veces superior al aplicado.

Por otra parte, a diferencia del comportamiento paramagnético o diamagnético, la relación entre la imantación y el campo aplicado no es lineal, e incluso, como se comentó, depende de la historia previa del material.

**Ciclo de histéresis.** Cuando un material ferromagnético es sometido a un campo magnético, experimenta una imantación que crece con el campo aplicado  $B_{ap}$ . Si se representa la imantación  $M$ , frente a  $B_{ap}$ , se obtiene la curva de primera imantación (1) como muestra la Figura 8-8. La imantación no crece indefinidamente, aunque se aumente mucho  $B_{ap}$ , la imantación no puede aumentar más allá de cierto límite denominado imantación de saturación  $M_s$ .

Si a continuación se disminuye gradualmente  $B_{ap}$ , el material pierde imantación, pero no toda. Aunque se anule el campo aplicado, queda una imantación remanente  $M_R$ . Si se quiere “borrar” todo resto de imantación, se deberá aplicar un campo externo o campo coercitivo  $B_c$ , en sentido contrario al previo. Si se sigue aumentando el campo aplicado en dicho sentido se alcanza de nuevo una imantación de saturación en sentido contrario al anterior, tal y como se observa en la Figura 8-8.

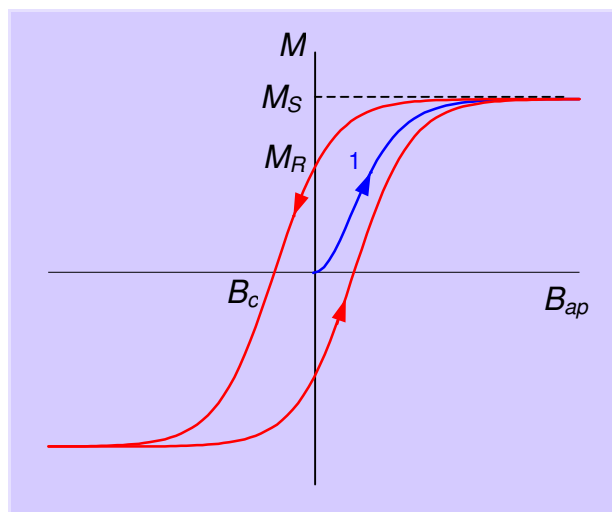


Figura 8-8. Ciclo de histéresis

Si posteriormente se disminuye gradualmente  $B_{ap}$ , y luego se vuelve a cambiar el sentido, los valores anteriores no se repiten, es decir la curva no es reversible. Este efecto se denomina histéresis, y al ciclo completo de imantación – desimantación que se produce al aplicar un campo magnético alterno, se denomina ciclo de histéresis. Los ciclos de histéresis se producen cuando se aplica a una barra de hierro un campo magnético que varía con el tiempo, por ejemplo sinusoidalmente: estamos magnetizando y desmagnetizando el material con una frecuencia igual a la del campo aplicado.

En esta curva de histéresis, el área delimitada es proporcional a la energía disipada en forma de calor en el proceso de imantación – desimantación.

Existen materiales ferromagnéticos de diverso tipo, y en relación al comportamiento descrito, pueden distinguirse unos materiales magnéticamente

“blandos”, que son aquéllos con una imantación remanente muy baja, y otros magnéticamente “duros”, con una imantación remanente alta, tal como muestra la Figura 8-9 y Figura 8-10 respectivamente. Los blandos producirán una disipación de energía en forma de calor muy pequeña: interesará en núcleos de transformador para evitar que se calienten. Los duros disipan más energía, pero interesan donde se desee una gran imantación remanente, como por ejemplo en los imanes permanentes o las memorias grabadas en soporte magnético.

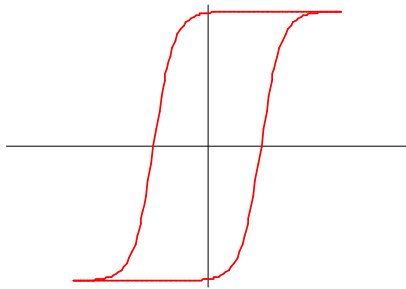


Figura 8-9. Material magnéticamente duro.  
La imantación remanente es muy alta

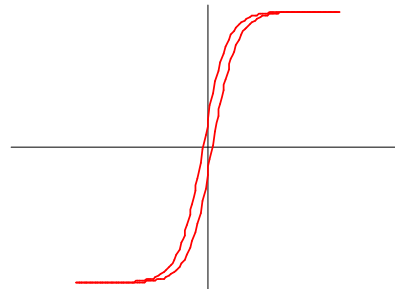


Figura 8-10. Material magnéticamente blando.  
La imantación remanente es muy baja

**Aplicación:** Una de las principales aplicaciones del ferromagnetismo es la grabación de información en soporte magnético. El soporte puede ser disco o cinta de material ferromagnético. Un cabezal de escritura está formado por un solenoide por donde circula una corriente que produce un campo magnético que imanta el soporte magnético, grabando la información transmitida por la corriente tanto información analógica como digital, como se muestra en la Figura 8-11.

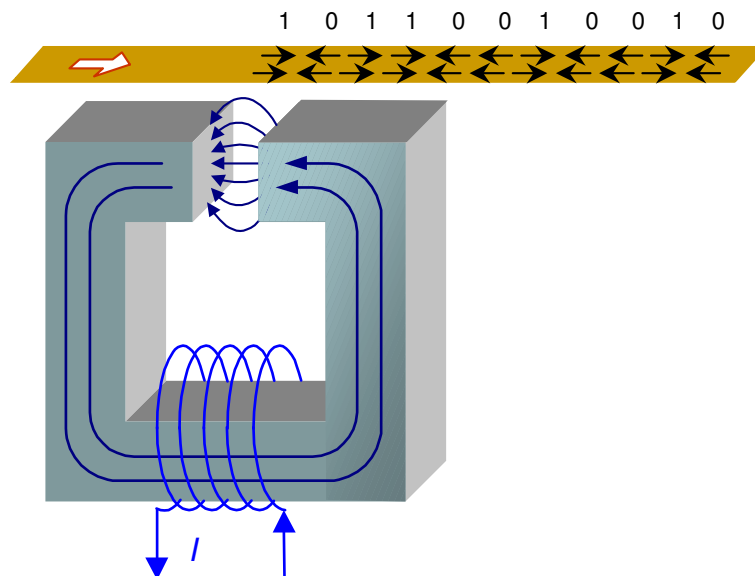


Figura 8-11. Grabación de información en soporte magnético

Para leer esta información, el disco o cinta debe moverse ahora en las cercanías de un cabezal lector, formado por un circuito pasivo en el que hay un núcleo de hierro con una bobina arrollada a su alrededor, Figura 8-12. De este



modo, al pasar el soporte magnetizado, inducirá en el núcleo un campo magnético variable que producirá un flujo magnético variable en la bobina, produciéndose, de este modo, una corriente inducida, y por tanto, la transformación de la información grabada en corriente eléctrica para su posterior tratamiento. El fundamento es válido tanto para información analógica como digital.

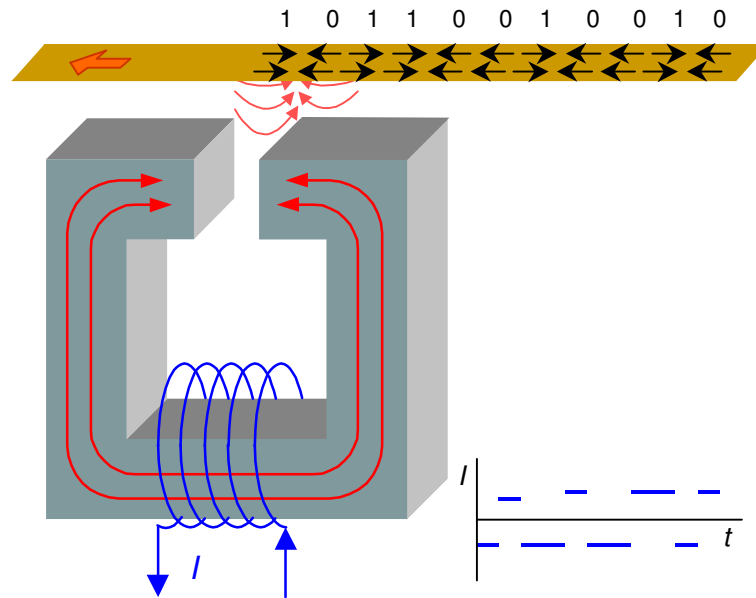


Figura 8-12. Lectura de información en soporte magnético