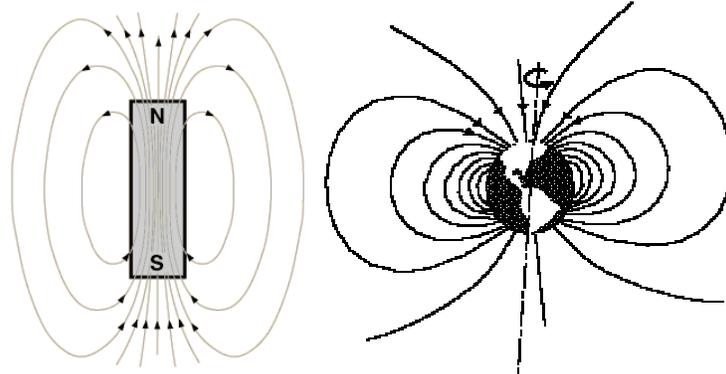


## Capítulo 3. Magnetismo

Todos hemos observado como un imán atrae objetos de hierro. La razón por la que ocurre este hecho es el magnetismo. Los imanes generan un campo magnético por su naturaleza. Este campo magnético es más intenso en dos zonas opuestas del imán, que son los polos norte y sur del imán. El polo norte de un imán se orienta hacia el norte geográfico, mientras que el polo sur lo hace hacia el sur geográfico (gracias a esta propiedad funcionan las brújulas). Esta orientación de los imanes se produce como consecuencia de las fuerzas magnéticas de atracción que se producen entre polos opuestos de imanes y de repulsión entre polos homólogos.



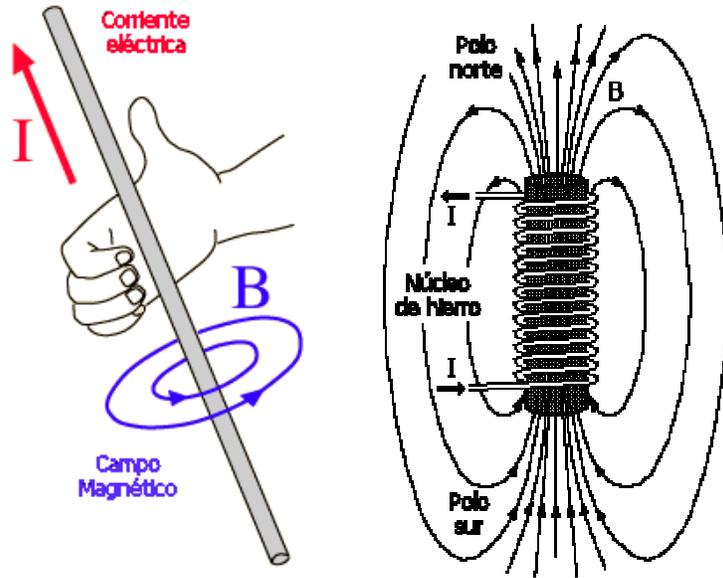
La tierra es un enorme imán cuyo polo norte se encuentra en el polo geográfico y en consecuencia el polo sur, en el norte geográfico, de ahí, que el polo norte de un imán se oriente al norte geográfico (donde se encuentre el polo sur magnético terrestre) y viceversa.

Los efectos de un imán se manifiestan en una zona donde decimos que existe un **campo magnético**. Los campos magnéticos los podemos representar gráficamente mediante las líneas de inducción magnética, que por convenio, salen del polo norte y entran por el polo sur (son líneas cerradas, por lo que no puede existir un imán con un solo polo).

La intensidad de un campo magnético la podemos cuantificar mediante la **inducción magnética** o **densidad de flujo B**. La unidad de medida de esta magnitud es el **Tesla (T)**. Al número total de líneas de inducción magnética que atraviesan una superficie magnética se denomina **flujo magnético  $\Phi$** . La unidad de medida para el flujo magnético es el **Weber (Wb)**

### CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR CARGAS ELÉCTRICAS EN MOVIMIENTO

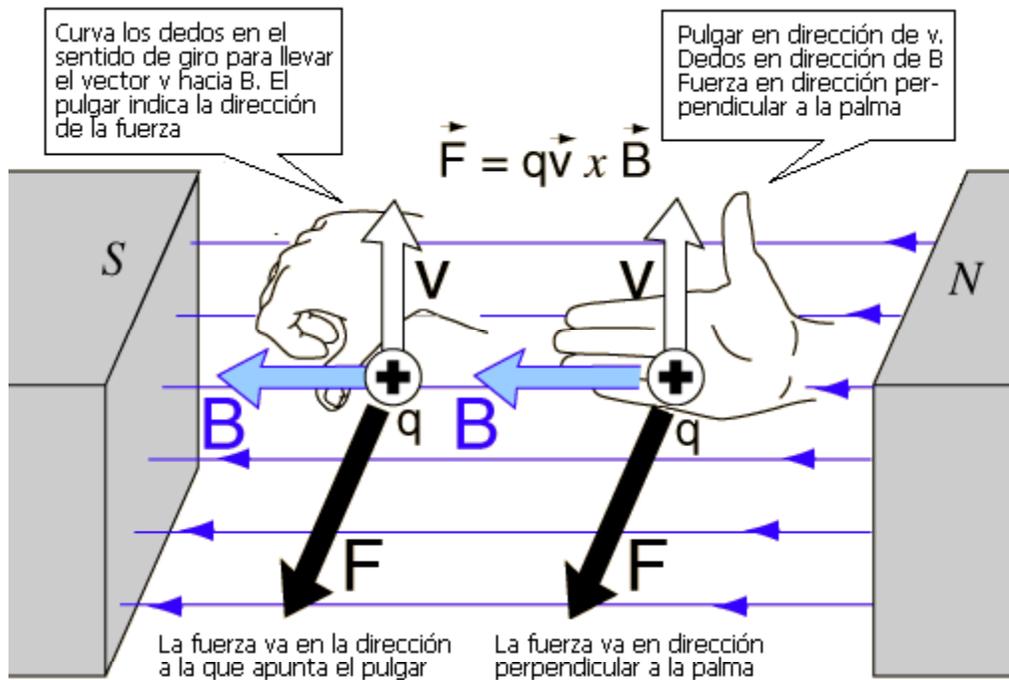
Además de los imanes, los campos magnéticos también pueden ser generados por las cargas eléctricas en movimiento. De acuerdo con la ley de **Biot y Savart**, la intensidad del campo magnético inducido por una carga eléctrica en movimiento es proporcional al valor de la carga eléctrica y su velocidad, e inversamente proporcional a la distancia que separa a la carga del punto donde estamos haciendo la medida. Como la corriente eléctrica es un desplazamiento de carga eléctrica (electrones), una carga eléctrica producirá un campo magnético. Una aplicación de este fenómeno son los electroimanes. Al hacer circular una corriente eléctrica por una bobina arrollada sobre un núcleo magnético, obtenemos un campo magnético.



**FUERZA MAGNÉTICA. LEY DE LORENTZ**

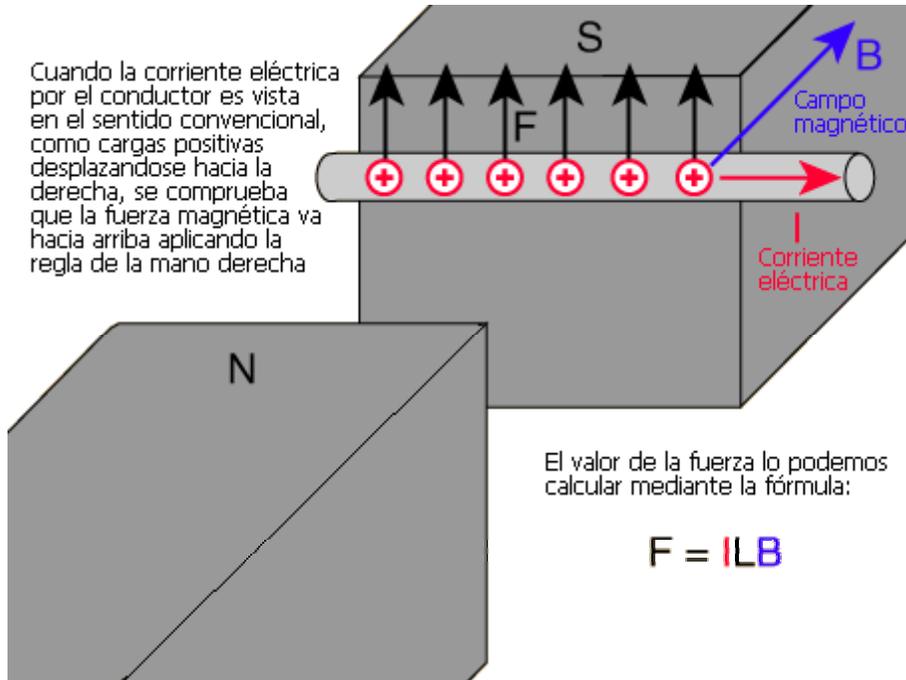
Dado que una carga eléctrica en movimiento induce un campo magnético, podemos considerar a esta carga como un imán. Pues bien, al igual que cuando aproximamos dos imanes comprobamos que entre ellos existe una fuerza (de repulsión si aproximamos polos homólogos y de atracción si los polos son opuestos), una carga eléctrica que se desplaza en las proximidades de un imán (en el seno de un campo magnético) también experimentará ese tipo de fuerzas.

El valor de esta fuerza depende del valor de la carga eléctrica en movimiento, la intensidad del campo magnético y de la velocidad a la que se desplaza la carga. Para determinar su valor podemos aplicar la ley de Lorentz. Para conocer su dirección y sentido se puede aplicar la regla de la mano derecha

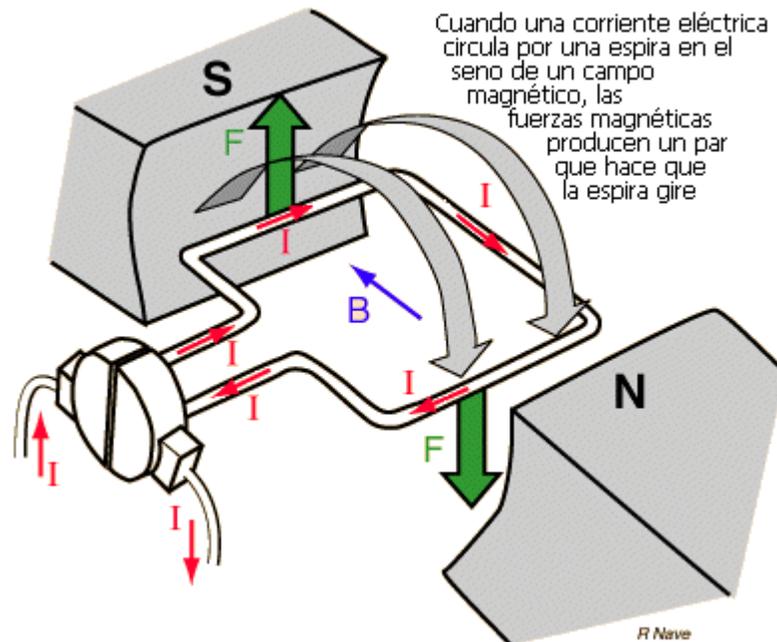


### FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN CONDUCTOR

Al igual que una carga eléctrica que se desplaza en el seno de un campo magnético experimenta una fuerza magnética, un conductor eléctrico por el que circulen cargas eléctricas (es decir, una corriente eléctrica) y que se encuentre en el seno de un campo magnético experimentará también una fuerza magnética. En este caso el valor de la fuerza ejercida sobre el conductor dependerá de la intensidad del campo magnético, la longitud del conductor y el valor de la corriente eléctrica que circule por el conductor:

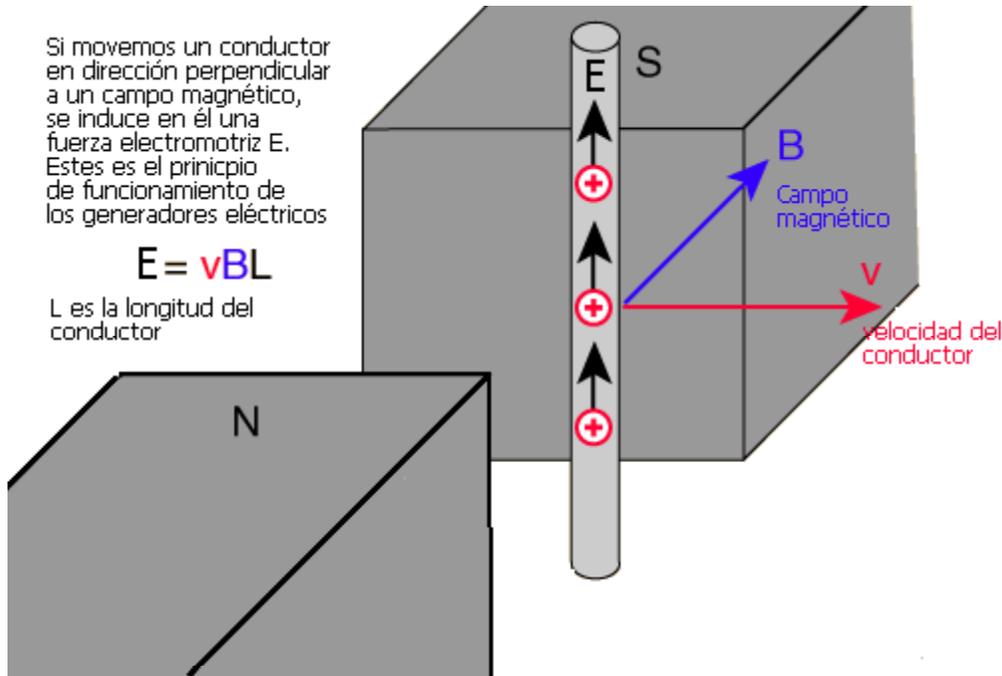


La principal aplicación práctica de este fenómeno la tenemos en los motores eléctricos. En los motores en vez de tener conductores eléctricos aislados, los tenemos en forma de espiras rectangulares. De esta forma, se nos presenta un par de fuerzas que hace que la espira tienda a girar:



### FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA. LEY DE LENZ

Hasta ahora hemos visto que un campo magnético puede ser [inducido por una corriente eléctrica](#) y como un campo magnético es capaz de producir una [fuerza sobre cargas eléctricas en movimiento](#). Ahora vamos a ver como un campo magnético puede inducir una fuerza electromotriz (tensión eléctrica) sobre un conductor. Efectivamente, si movemos un conductor que se encuentra en el seno de un campo magnético, sobre él se inducirá una fuerza electromotriz. El valor de esta fuerza depende de la velocidad a la que el conductor se mueva, la longitud de este y de la intensidad del campo magnético:



### PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES

No todos los materiales se comportan de igual manera frente a los campos magnéticos. Un clavo de hierro es atraído por un imán, pero un trozo de madera no experimenta ninguna fuerza en las proximidades de ese mismo imán.

El comportamiento de los materiales frente a los campos magnéticos depende de la estructura interna del material. El movimiento de los electrones que forman un material hace que se induzcan pequeños campos magnéticos. En función de cómo se orienten estos pequeños campos magnéticos en presencia de un campo magnético externo los materiales presentan estas propiedades:

- **Diamagnéticos:** Esta propiedad magnética consiste en que parte de los pequeños campos magnéticos inducidos por el movimiento de rotación de los electrones del propio material, en presencia de un campo magnético externo, se orientan de forma opuesta a este. Como consecuencia, un material diamagnético tiende a desplazarse a la zona donde el campo magnético externo es más débil. Todos los materiales presentan la propiedad del diamagnetismo, lo que sucede es que este efecto es tan débil que queda oculto por otros efectos que veremos a continuación.
- **Paramagnéticos:** Esta propiedad magnética consiste en que parte de los pequeños campos magnéticos inducidos por el movimiento de rotación de los electrones del propio material, en presencia de un campo magnético externo se alinean en la misma dirección que este. Como consecuencia, el campo magnético en el interior se hace más intenso, y el material tiende a desplazarse al lugar donde el campo magnético externo es más intenso.
- **Ferromagnéticos:** En los materiales ferromagnéticos, las fuerzas entre los átomos próximos, hace que se creen pequeñas regiones, llamadas dominios, en las que el campo magnético originado por el movimiento de rotación de los electrones está alineado en la misma dirección. En ausencia de campo magnético externo, los dominios están orientados al azar, pero al aplicar un campo magnético externo, estos dominios se alinean en la dirección del campo aplicado, haciendo que este se intensifique en el interior del material de forma considerable. Parte de estos dominios conservan la orientación incluso una vez que el campo magnético externo desaparece, hecho que explica el fenómeno de la

imantación. Los materiales ferromagnéticos (hierro y aleaciones férreas) tienen mucha aplicación en las máquinas eléctricas.

### EL CICLO DE HISTÉRESIS DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

La figura de la derecha representa los dominios magnéticos de un material ferromagnético. Estos dominios, son regiones con un campo magnético resultante de la suma de los campos magnéticos originados por el movimiento de los electrones de los átomos que conforman estas regiones.

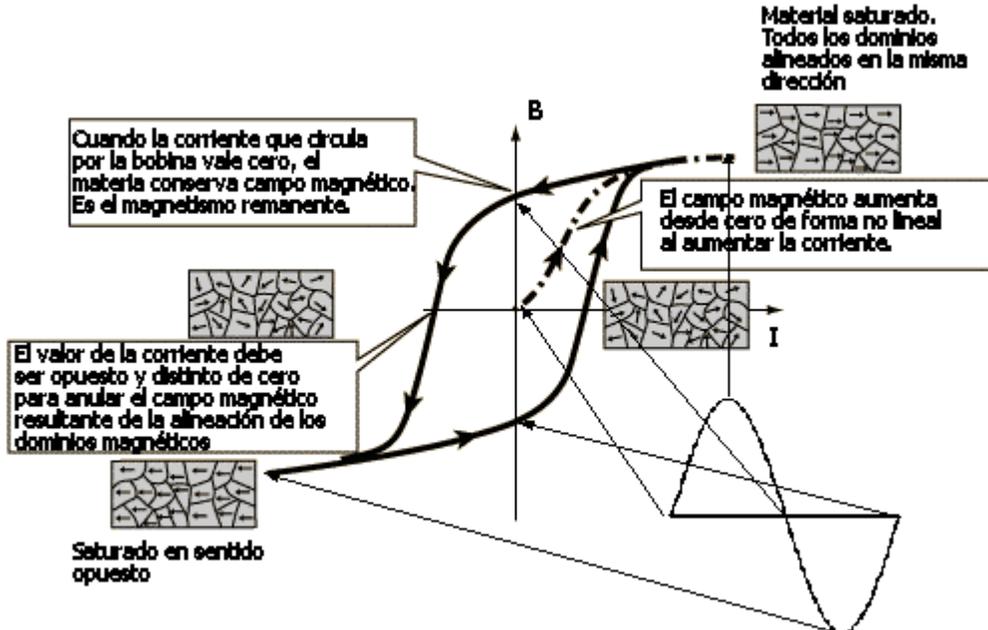


Si sobre un material ferromagnético no actúa ningún campo magnético externo, la orientación de los campos magnéticos de los dominios está ordenada al azar, como en la figura, pero si se aplica un campo magnético externo (como por ejemplo ocurre en los electroimanes), los campos magnéticos de estos dominios se orientan progresivamente en la dirección del campo magnético aplicado.

Como consecuencia de esto, el campo magnético aplicado sobre el material ferromagnético se incrementa gracias a la aportación de los campos magnéticos aportado por los dominios.

Si construimos un electroimán con un núcleo de material ferromagnético (hierro), la intensidad del campo magnético inducido por la bobina no sólo dependerá del número de espiras de la bobina y de la corriente que circule por la misma, también dependerá de la aportación de los campos magnéticos de los dominios.

En el caso de que la corriente que circule por la bobina sea una corriente alterna, los dominios magnéticos están en constante movimiento, ya que tienden a orientarse en la dirección del campo alterno inducido en la bobina. Si representamos el valor del campo magnético en función del valor de la corriente (alterna) que circula por la bobina tenemos el llamado ciclo de histéresis



Cuando un material ferromagnético es sometido a un campo magnético alterno, se calienta debido a la energía que se consume al completarse el ciclo de histéresis. Esta energía es proporcional al área del ciclo de histéresis, por lo que a la hora de reducir las pérdidas en las máquinas eléctricas, estas deben construirse con materiales ferromagnéticos en los que el área del ciclo de histéresis sea lo menor posible.

### EL CIRCUITO MAGNÉTICO

Las máquinas eléctricas necesitan de un campo magnético para funcionar. Igual que la corriente eléctrica necesita un circuito de material conductor (cobre o aluminio) por donde circular, el campo magnético también necesita un circuito de material ferromagnético por donde circular. Para saber cuántas espiras debe tener la bobina que induce el campo magnético, o que sección debe tener el circuito magnético etc. se hace necesario estudiar los circuitos magnéticos.

Para poder hacer este estudio tenemos que definir una nueva magnitud, la **intensidad de campo** magnético o **excitación magnética H**. Su valor viene dado por la siguiente fórmula:  $H = N \cdot I / l$ , donde N es el número de espiras de la bobina inductora, I la corriente que circula por la misma y l la longitud de la bobina (del

núcleo magnético donde está arrollada la bobina). La unidad de medida de la intensidad de campo magnético es el amperio/metro (A/m).

A partir de la intensidad de campo, podemos calcular la inducción magnética mediante la fórmula  $B = \mu \cdot H$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética del material que se utiliza como núcleo de la bobina.

Como el flujo magnético es  $\phi = B \cdot S$ , entonces podemos calcular el flujo:

$$\phi = \frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot S}{l} = \frac{N \cdot I}{\frac{l}{\mu \cdot S}}$$

Al numerador de esta expresión se le denomina fuerza magnetomotriz ( $F_m = N \cdot I$ ) y al denominador, reluctancia magnética ( $R_m = l / (\mu \cdot S)$ ).

Por lo tanto el flujo magnético podremos calcularlo como:  $\phi = \frac{F_m}{R_m}$ , expresión conocida como ley de

Hopkinson, que podemos considerar al equivalente a la ley de Ohm para circuitos magnéticos. El flujo magnético sería el equivalente a la intensidad de corriente, la Fuerza magnetomotriz, sería el equivalente a la fuerza electromotriz y la reluctancia magnética el equivalente a la resistencia eléctrica.

Las unidades de medida de la fuerza magnetomotriz son los amperios (aunque también se suele expresar como amperios-vuelta) y las de la reluctancia magnética son la inversa de los Henrios  $H^{-1}$ .

### Capítulo 3. Ejercicios.

- Una carga eléctrica de 1 culombio se mueve a una velocidad de 2 m/s en dirección perpendicular a un campo magnético con una intensidad de campo de 2 Teslas. Calcular el valor de la fuerza que experimentará esta carga.

*Solución: 4 N*

- En el seno de un campo magnético con una intensidad de 4,5 Teslas, se desplaza, en dirección perpendicular a este, una carga de 50 mC. A que velocidad deberá desplazarse esta carga si queremos que sobre la carga actúe una fuerza electromagnética de 5 N

*Solución: 22,2 m/s*

- Calcula el valor de la corriente que debe circular por un conductor de 50 cm de longitud que se encuentra situado perpendicularmente a un campo magnético de 2,5 T si queremos que sobre el actúe una fuerza de 4 N.

*Solución: 3,2 A*

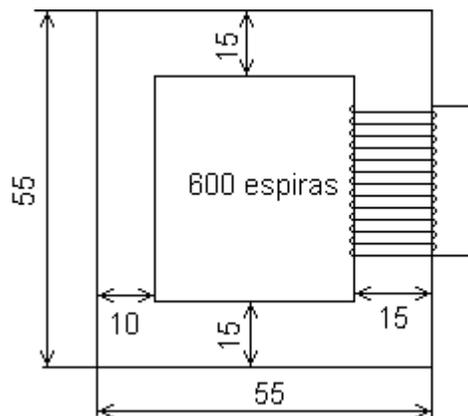
- Calcular el valor de la intensidad de campo magnético a la que debemos someter un conductor de 50 cm de longitud, si queremos que cuando se desplaza en dirección perpendicular al campo a una velocidad de 2,5 metros por segundo, se induzca en el una fuerza electromotriz de 10 V.

*Solución: 8 T*

- El diámetro del rotor de una dinamo es de 16 cm, y su longitud es de 20 cm. Sabiendo que la Inducción magnética en el entrehierro es 2 T y que el rotor de la dinamo gira a 1500 r.p.m. calcular el valor que se inducirá en cada uno de los conductores que forman las bobinas del inducido de la dinamo (longitud de cada conductor: 20 cm)

*Solución: 5,03 V*

- La figura muestra un núcleo ferromagnético. La sección del núcleo es de 25 centímetros cuadrados y el resto de las dimensiones son las señaladas en la figura (cotas en centímetros). Calcular el valor de la corriente que producirá un flujo de 0,5 mWb, sabiendo que la permeabilidad del material es  $50 \cdot 10^{-5} \text{ T}\cdot\text{m/A}$



*Solución: 110 A*