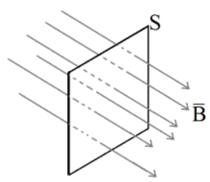
FÍSICA 2º BACHILLERATO

BLOQUE TEMÁTICO: INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

---

1) Concepto de flujo magnético.



Sea S una superficie unidad que es perpendicular a las líneas de un campo de fuerzas cualquiera (campo gravitatorio, eléctrico o magnético).

① Definición de partida.

Se llama flujo (ϕ) del campo a través de la superficie S, al producto de la intensidad del campo por el área de la superficie perpendicular al campo.

Para el campo magnético, según la definición general, el flujo magnético será:

$$\phi = B \cdot S$$

② Unidades.

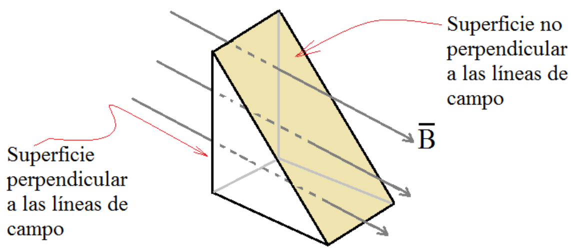
La definición de partida anterior permite definir la unidad de flujo magnético. En el S.I. se llama weber (Wb).

$$1\,Weber\,(Wb) = 1\,Tesla\,(T) \cdot 1\,metro\,cuadrado\,(m^2)$$

El resultado de despejar la unidad de inducción magnética en la expresión anterior permite obtener una forma alternativa de expresar el tesla como unidad de intensidad de campo magnético:

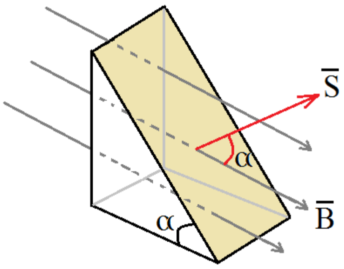
$$1\,T = 1\,Wb \cdot 1\,m^{-2}$$

③ Ampliación de la definición de flujo magnético.



El flujo de un campo de fuerzas nos da una idea del número de líneas de fuerza que atraviesan la unidad de superficie. Si la unidad de superficie elegida no es perpendicular a las líneas de fuerza, el flujo es función del ángulo que forma dicha superficie con las líneas de fuerza. Para conocer el valor del flujo en este caso, debemos ampliar su definición.

Definiremos un vector superficie, $\vec{S}$, de la siguiente manera:



- Módulo: el valor de la superficie en m^2.
- Dirección: perpendicular a la superficie.
- Sentido: si la superficie es cerrada (superficie que encierra un volumen), hacia fuera de dicha superficie; si la superficie es plana, aquel sentido que forme un ángulo menor con el vector campo.

Una vez definido este vector, el ***flujo que atraviesa una superficie cualquiera se define*** como el producto escalar de los vectores superficie e inducción magnética,

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

donde α es el ángulo que forma el vector intensidad de campo ($\vec{B}$) y el vector superficie ($\vec{S}$).

El producto $S{\cdot}cos\,\alpha$ se denomina superficie efectiva para el flujo.

2.- Inducción magnética. Experiencias de Henry y Faraday.

① Se sabe que:

- Un campo magnético constante genera una fuerza magnética sobre una corriente eléctrica. Si no hay corriente eléctrica no hay fuerza magnética. Si la corriente eléctrica pasa a través de un hilo recto la expresión de la fuerza magnética viene dada por la ley de Laplace.

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l}\, x\, \vec{B})$$

- Una corriente eléctrica pasando a través de un conductor genera un campo magnético. Las expresiones de este campo magnético para los alrededores de un hilo infinito, el centro de una espira circular o en el eje central de un solenoide son, respectivamente,

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \qquad B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot radio} \qquad B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

Se puede observar en estas expresiones que el campo magnético en un punto determinado alrededor del hilo, en el centro de la espira circular o en el eje central del solenoide, se mantiene constante si la intensidad de corriente que pasa por los conductores es constante.

② Situación de partida en este tema: un conductor por el que en un principio no circula corriente alguna y que se verá inmerso en el seno de un campo magnético variable. Cuando ocurre esto, por el conductor pasa una corriente que denominaremos inducida.

La inducción electromagnética es el proceso mediante el cual se genera una corriente eléctrica en un circuito como resultado de la variación de un campo magnético.

③ Experiencias de Faraday.

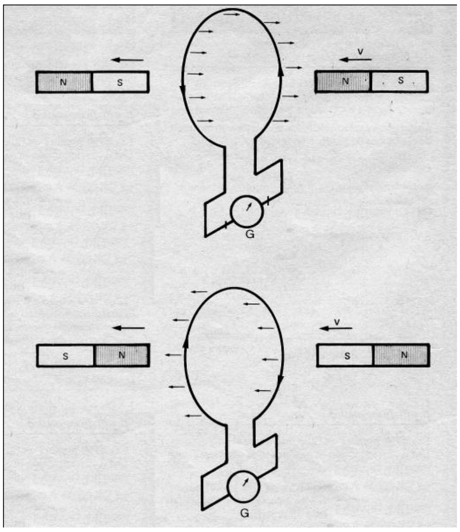
Faraday estaba convencido de que un campo magnético es capaz de producir una corriente eléctrica. Descubrió que esto era posible cuando dejó de trabajar con campos magnéticos constantes. En 1832, después de una década de intentos infructuosos, lo consiguió.

Las experiencias se verán aquí modificadas convenientemente, con fines didácticos. Así, por ejemplo, para simplificar se estudia lo que le ocurre a una sola espira en un circuito eléctrico, pero las conclusiones obtenidas serían las mismas si en lugar de una sola espira se tratara de un solenoide.

<u>Experiencia 1</u>

Sea una espira por la que en un principio no pasa corriente alguna. En el circuito de la espira montamos un galvanómetro (un instrumento que permite saber si está pasando corriente por el circuito de la espira y, además, el sentido de dicha corriente).

Podemos distinguir cuatro casos:



1) Si acercamos el polo norte de un imán comprobamos que el galvanómetro marca paso de una corriente.
2) Cuando el imán se aleja por un polo sur la corriente de inducción tiene el mismo sentido que en el caso anterior.
3) Si acercamos el polo sur se observa una corriente en la espira de sentido contrario a los dos casos anteriores.
4) Si alejamos el polo norte, el sentido de la corriente en la espira es la misma que en el caso 3.

La corriente únicamente existe en la espira en los momentos que se acerca o se aleja el imán. Nunca cuando el imán está inmóvil, cualquiera que sea su proximidad a la espira.

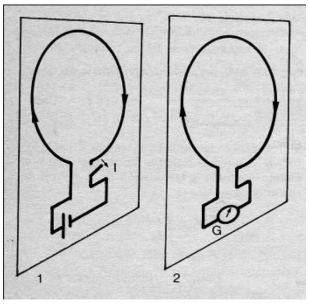
Estas corrientes reciben el nombre de "corrientes inducidas"; el imán o electroimán es el **"sistema inductor"** y la espira es el **"circuito inducido".**

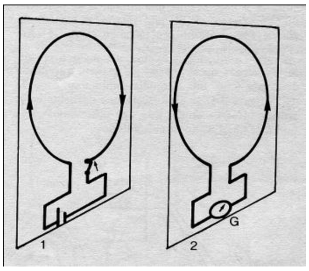
Los cuatro casos anteriores también ocurren si el imán se mantiene inmóvil y es la espira la que se acerca o aleja (movimiento relativo).

Experiencia 2

Supongamos ahora dos espiras colocadas paralelamente y muy próximas una de otra. La espira 1 está alimentada por un generador de corriente y provista de un interruptor.

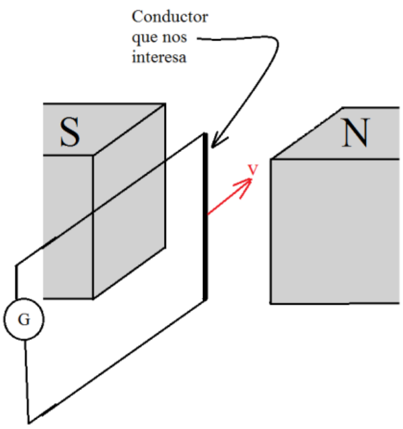
Se observa que cuando abrimos o cerramos el circuito de la espira 1 se producen corrientes en la espira 2.





④ Experiencia de Henry

Casi simultáneamente (1831) y de manera independiente, J. Henry descubría que si un conductor de longitud l se mueve perpendicularmente a un campo magnético, se origina una diferencia de potencial en los extremos del conductor. Esta diferencia de potencial origina una corriente si el alambre forma parte de un circuito cerrado.

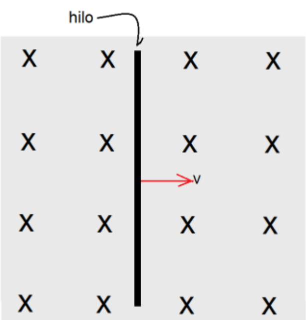


Obsérvese la figura adjunta. Un hilo conductor se introduce en el seno de un campo magnético uniforme. Se observa que:

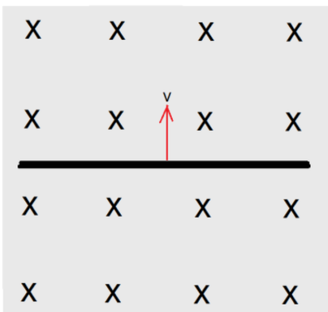
1) Si el conductor se mueve hacia dentro o hacia fuera del papel, tal como se presenta en la figura adjunta, el galvanómetro registra paso de corriente eléctrica.

2) Si el conductor puesto en horizontal respecto a como se presenta en la figura, se mueve de abajo hacia arriba, el galvanómetro G registra paso de corriente eléctrica.

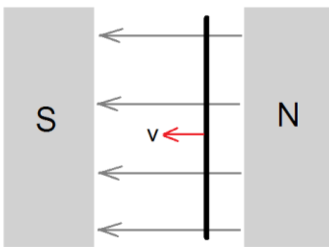
3) Si el conductor se mueve, tal como se ve en la figura, desde el polo norte hacia el polo sur (o viceversa) el galvanómetro no registra paso de corriente eléctrica.



1) Hay paso de corriente



2) Hay paso de corriente



3) No hay paso de corriente

El sentido de la corriente inducida es variable, por ejemplo, si el conductor se mueve hacia arriba, la corriente circula en un sentido. Si el conductor se mueve hacia abajo, la corriente circula en sentido contrario al anterior.

La corriente inducida aparece mientras el conductor se está moviendo. Si el conductor se para la corriente cesa.

⑤ Interpretación de las experiencias de Faraday.

La interpretación se hará en términos de flujo magnético.

Idea principal: la causa de las corrientes inducidas es la variación del flujo magnético que atraviesa el plano del inducido (conductor donde se genera la corriente inducida).

Como la expresión del flujo magnético es

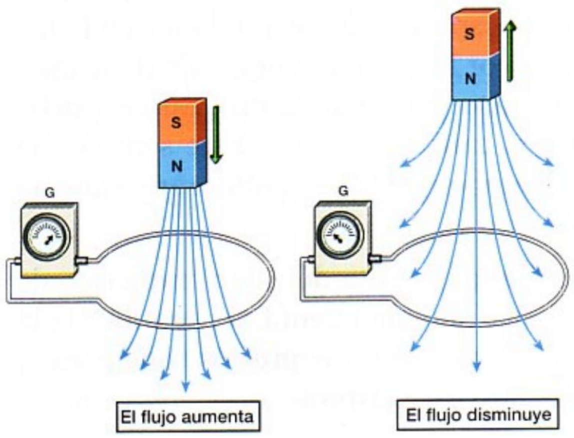
$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

el flujo magnético puede variar por las siguientes razones (aisladas o conjuntas)

- Variación de la inducción magnética.
- Variación de la superficie.
- Variación de la orientación de los vectores $\vec{B}$ y $\vec{S}$.

1) Variación de la inducción magnética ($\vec{B}$). En las experiencia nº 1 de Faraday varía la inducción magnética al acercarse o alejarse el imán o la espira del inducido. Por tanto, si varía el campo magnético, varía el flujo magnético y hay corriente inducida.

Si el imán se para, $\vec{B}$ vuelve a ser constante, el flujo no varía y no hay paso de corriente.

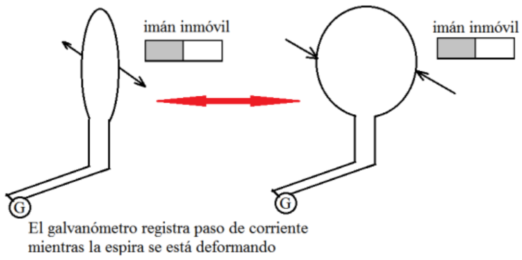


Por tanto, en esta experiencia $\Delta\phi \neq 0$ porque está cambiando la inducción magnética.

Si este razonamiento es cierto, entonces si pudiéramos variar los otros parámetros de los que depende el flujo magnético, también se generarían corrientes inducidas, como se verá a continuación.

2) Variación de la superficie de la espira.

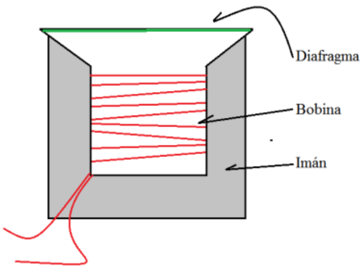
Supongamos la situación de partida de la primera experiencia de Faraday: tenemos una espira enfrentada a un imán, pero el imán lo dejamos inmóvil. Si pudiéramos deformar la espira, se observará que el galvanómetro registra paso de corriente eléctrica mientras la deformación se está produciendo.



3) Variación de la orientación relativa de $\vec{B}$ y $\vec{S}$

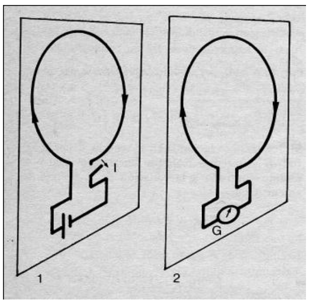
Si la espira gira en presencia de un imán fijo, varía en todo momento la orientación del vector superficie con relación al campo magnético. Por tanto, varía el flujo y se produce corriente inducida. El paso de corriente cesa cuando el giro de la espira cesa.

⑥ El micrófono.



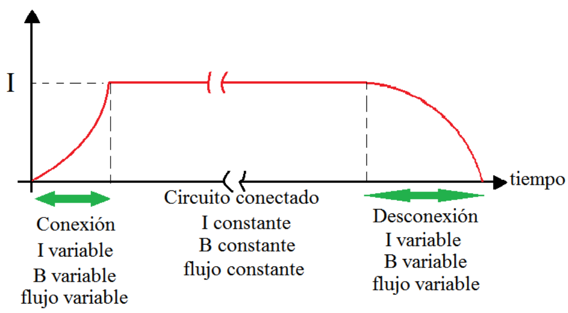
Las ondas sonoras hacen vibrar el diafragma el cual hace que se mueva solidariamente la bobina asociada que está inmersa en un campo magnético. El movimiento del conductor en el seno de un campo magnético genera una fuerza electromotriz pequeña (aprox. 10^{-3} V) que posteriormente es amplificada.

Explicación de la experiencia nº 2 de Faraday.



La corriente que pasa por el circuito nº 1 es constante y ambos circuitos no se mueven. En esta situación se crea un campo magnético debido a la corriente que pasa por el circuito nº 1, pero esta inducción magnética es constante y no hay variación de flujo. Por tanto, no hay corriente inducida mientras esté circulando corriente por el circuito nº 1.

El paso de corriente eléctrica por el circuito nº 2, cuando se conecta o desconecta el circuito inductor, se explica de la siguiente manera: al conectar el circuito nº 1 la intensidad de corriente que se origina no se alcanza de forma instantánea sino que se adquiere el valor de intensidad de una forma rápida desde I = 0. Durante este tiempo (décimas o centésimas de segundo) la intensidad de corriente es variable. Como la inducción magnética depende de forma directa de la intensidad de corriente, durante este tiempo la inducción es variable y, en consecuencia el flujo también. De la misma manera, al desconectar el circuito nº 1 la intensidad de corriente no desaparece instantáneamente sino que decrece hasta I = 0 durante un tiempo. En este intervalo de tiempo el campo magnético vuelve a ser variable, se produce una corriente inducida por la variación del flujo magnético.



⑥ Interpretación de la experiencia de Henry.

El fenómeno de inducción en el hilo conductor se puede considerar como una consecuencia de la ley de Lorentz.

Supongamos de partida un hilo conductor de longitud *l* colocado perpendicularmente a las líneas de inducción magnética en un campo uniforme. En esta situación no hay una diferencia de potencial entre los extremos del hilo (no habría paso de corriente si el hilo formara parte de un circuito eléctrico) ya que al no moverse el conductor la velocidad en la expresión de la ley de Lorentz se hace cero.

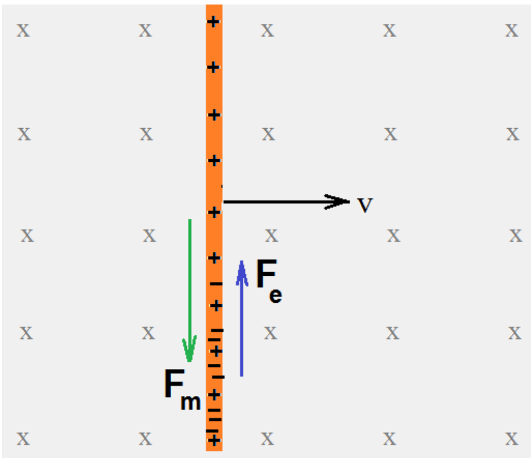
$$\vec{F}_m = q \cdot (\vec{v} \, x \, \vec{B})$$

No quiere decir esto que las cargas eléctricas (los electrones que forman parte de los átomos) en el conductor no se estén moviendo. Lo están haciendo pero de una forma aleatoria de manera que el resultado global de la fuerza que sufre el hilo es cero.

Si el hilo se mueve en el sentido perpendicular al campo, por ejemplo, hacia la izquierda en la figura, cada una de las cargas negativas representadas tiene una componente de velocidad hacia dicho sentido y, por tanto, sufre una fuerza magnética que va dirigida hacia abajo (regla de la mano izquierda teniendo en cuenta que se trata de electrones).

Los electrones que sufren esta fuerza son los más externos en las capas externas de los átomos del metal. Los núcleos atómicos y los electrones más internos también sufren esta fuerza, pero los núcleos están firmemente anclados a la red cristalina del metal y los electrones más internos están muy ligados a dichos núcleos.

En el conductor se genera una zona de concentración de carga negativa y una zona de concentración de carga positiva, es decir, una diferencia de potencial. Cuando ocurre esto los electrones del extremo se ven sometidos ahora también a una fuerza eléctrica que tiende a llevarlos a su posición original.



La situación de separación de cargas eléctricas se mantiene hasta que la fuerza magnética global se iguala con la fuerza eléctrica global.

$$F_e = F_m$$

En este momento se alcanza un equilibrio y se ha creado una diferencia de potencial de manera que se cumple que,

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B$$

$$E = v \cdot B$$

La situación es similar a la de un condensador cargado, es decir, podemos poner que la diferencia de potencial entre los extremos del hilo es

$$\Delta V = E \cdot l$$

por tanto,

$$\Delta V = v \cdot B \cdot l$$

Ahora bien, si el hilo forma parte de un circuito eléctrico, tal como se ha visto en la experiencia de Henry, esta diferencia de potencial se traducirá en una corriente eléctrica generada en el circuito.

Si se invierte el sentido del movimiento del hilo conductor también se invertirá la polaridad en el hilo, conclusión lógica de la aplicación de la regla de la mano izquierda.

En el caso de que el conductor se mueva de manera que el sentido de su movimiento forme un ángulo α con el vector inducción magnética, la diferencia de potencial generada entre los extremos del hilo será:

$$\Delta V = v \cdot B \cdot l \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

así, si se mueve en la misma dirección que la inducción magnética el ángulo será cero (mismo sentido) o 180º (sentido opuesto) y, por tanto, no habrá paso de corriente.

3.- Leyes de la inducción magnética.

Una vez analizado cómo se producen las corrientes inducidas, el objetivo es caracterizar dichas corrientes. Dicha caracterización se consigue a través de dos leyes:

- *Ley de Lenz*. Permite conocer el sentido de la corriente inducida.

- *Ley de Faraday*. Permite conocer la fuerza electromotriz de la corriente inducida.

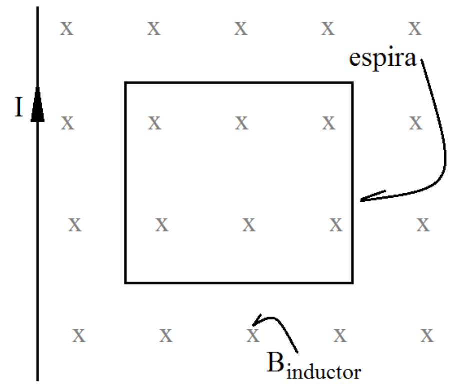
3.1.- Ley de Lenz.

H. Lenz (1804-1865) descubrió esta ley en 1833-34 siendo profesor de física de la Universidad de San Petersburgo.

Una corriente se induce en un sentido tal que los efectos que genera tienden a oponerse al cambio de flujo que origina

Por tanto, si en un problema determinado se genera una corriente inducida por un aumento del flujo, el sentido de dicha corriente será tal que sus efectos magnéticos se opondrán a dicho aumento (y viceversa). Veamos alguna aplicación de la ley de Lenz a casos concretos.

Sea un hilo largo e infinito por el que pasa una corriente cuya intensidad aumenta con el tiempo. Si al lado de dicho hilo se encuentra una espira cuadrada ¿cuál será el sentido de la corriente inducida en la espira?

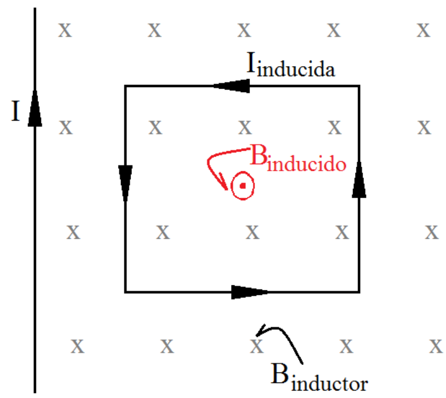


El sentido del campo magnético generado por el hilo en la zona donde se encuentra la espira viene representado en la figura adjunta (véase tema anterior para conocer los detalles de cómo se determina dicho campo). Su valor es

$$B_{inductor} = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r}$$

Este valor es variable porque la intensidad de corriente es variable. Concretamente, al ir aumentando I con el tiempo la inducción magnética que genera el hilo también va creciendo con el tiempo y, por tanto, el flujo magnético aumenta con el tiempo. La consecuencia de este aumento del flujo magnético es la inducción de una corriente en la espira que a su vez genera un campo magnético inducido.

Según la ley de Lenz, la corriente inducida es tal que sus efectos magnéticos se oponen al aumento del flujo, es decir, a que el campo inductor aumente. Por tanto, la espira debe generar un campo magnético inducido ($B_{inducido}$) tal que su sentido sea contrario al que ya existe. Para que esto ocurra el sentido de la corriente inducida viene representado en la siguiente figura.

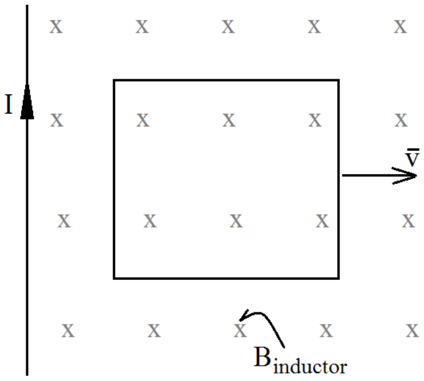


Por tanto, el campo magnético resultante en el centro de la espira será:

$$\vec{B} = \vec{B}_{inductor} + \vec{B}_{inducido}$$

cuyo módulo es

$$|B| = |B_{inductor} - B_{inducido}|$$

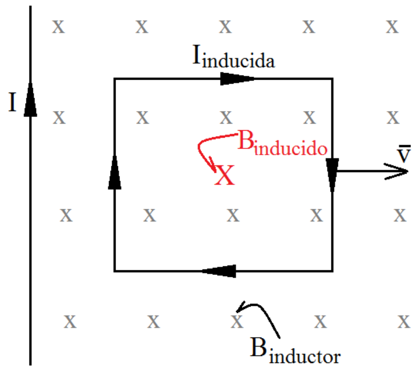


Supongamos ahora la misma situación de partida anterior pero siendo la intensidad de corriente inductora constante. Supongamos también que la espira se mueve como se indica en la figura adjunta.

El valor del campo magnético inductor es

$$B_{inductor} = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r}$$

en este caso, al alejarse la espira del hilo, el campo magnético en el que se encuentra inmersa va disminuyendo ya que la distancia al hilo va aumentando y esta se encuentra en el denominador de la expresión. Por tanto, el flujo magnético está disminuyendo y, según la ley de Lenz, la corriente inducida en la espira generará un campo magnético inducido cuyos efectos se deben oponer a que el flujo disminuya. Para que esto ocurra el campo magnético inducido debe tener el mismo sentido que el campo magnético inductor, lo cual ocurre cuando la intensidad inducida tiene el sentido expresado en la figura siguiente.



Por tanto, el campo magnético resultante en el centro de la espira será:

$$\vec{B} = \vec{B}_{inductor} + \vec{B}_{inducido}$$

cuyo módulo es

$$|B| = |B_{inductor} + B_{inducido}|$$

La ley de Lenz es una consecuencia del principio de conservación de la energía. Si el sentido de la corriente inducida fuese favorecer la causa que lo produce, se generaría energía ilimitada de la nada. En el ejemplo anterior, si el sentido de la corriente inducida fuese el contrario, la espira equivaldría a un "imán inducido" con el polo sur enfrentado al polo norte del "imán inductor". Esto aceleraría de forma continua al imán inductor, aumentando ilimitadamente su energía cinética. Esto es imposible.

3.2.- Ley de Faraday

La corriente inducida es producida por una fuerza electromotriz inducida que es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo y al número de espiras del inducido.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde ε es la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida, en voltios; N es el número de espiras del circuito inducido; $\Delta\phi/\Delta t$ es la expresión que indica la rapidez con que varía el flujo magnético, en wb/s. El signo "-" de la expresión viene impuesto por la ley de Lenz y recoge el hecho de que si el flujo aumenta ($\Delta\phi > 0$) la corriente inducida tiene sentido contrario a si el flujo disminuye ($\Delta\phi > 0$).

La ley de Faraday también se puede expresar en términos de diferenciales

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi}{dt}$$

Como sabemos, para cualquier circuito que cumple con la ley de Ohm,

$$\varepsilon = R \cdot I$$

donde R es la resistencia óhmica del circuito. La intensidad de corriente inducida será entonces,

$$I = \frac{N}{R}\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

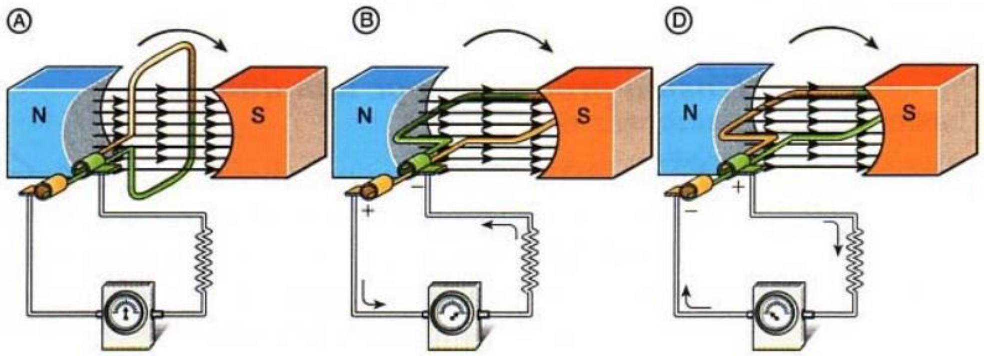
En esta expresión se ha prescindido del signo "-" pues se utiliza para determinar el valor de la intensidad. Para determinar el sentido de la intensidad es preferible utilizar la ley de Lenz.

De la ley de Faraday deducimos que se creará f.e.m. inducida cuando varíe el flujo, es decir, cuando varíe el campo, o la superficie o la posición relativa del vector superficie y el vector campo.

4.- Aplicaciones.

4.1.- Producción de corrientes alternas.

Supongamos una espira rectangular que gira sobre un eje central en el sentido de las agujas del reloj entre los polos de un potente imán inductor.



-En el momento de comenzar la experiencia la espira está perpendicular a las líneas de fuerza del imán (posición A en la figura anterior). En esta situación el flujo que atraviesa la espira es máximo,

$$\phi_A = B \cdot S \cdot \cos 0 = B \cdot S$$

-Cuando la espira gira un ángulo de 90 grados el flujo se anula

$$\phi_B = B \cdot S \cdot \cos 90 = 0$$

-La espira continua su giro otros 90 grados. En esta posición C (no representada en la figura) el flujo vuelve a ser máximo

$$\phi_C = B \cdot S \cdot \cos 180 = -B \cdot S$$

-Cuando la espira ha girado 270 grados desde el instante inicial (posición D) el flujo vuelve a ser cero

$$\phi_D = B \cdot S \cdot \cos 270 = 0$$

-Finalmente se completa el giro, 360 grados, volviendo la espira a la posición inicial.

Las posiciones posibles de la espira en un giro completo son infinitas. El ángulo (φ) de cada una de estas posiciones posibles (en radianes) se puede conocer si sabemos la velocidad de giro de la espira, es decir, su velocidad angular

$$\omega = \frac{angulo\ barrido}{tiempo} = \frac{\varphi}{t} \ \rightarrow \ \varphi = \omega \cdot t$$

Por tanto, el flujo magnético que atraviesa la espira en cualquier posición será,

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos \varphi = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

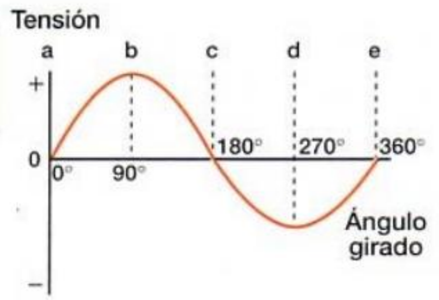
En esta experiencia, al ser B y S constantes, la corriente inducida se produce debido a la variación del ángulo y será proporcional al $\cos \omega t$.

Veamos algunas características de las corrientes inducidas de esta manera:

1- El cambio de signo en el flujo se debe al cambio de signo en la función trigonométrica.

2- La variación del flujo magnético lleva asociada una corriente inducida cuya f.e.m. será

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen}\, \omega t$$



Podemos ver en la gráfica anterior que la f.e.m. inducida es máxima en las posiciones en las que el flujo es mínimo (el flujo depende de la función coseno y la f.e.m. inducida de la función seno).

3- La f.e.m. máxima será, en voltios, cuando sen $\omega t = \pm 1$. Entonces,

$$\varepsilon_m = B \cdot S \cdot \omega$$

4- La intensidad de la corriente inducida de esta manera se determina a partir de la ley de Ohm. Si R es la resistencia óhmica del circuito

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B \cdot S \cdot \omega \cdot \operatorname{sen} \omega t}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \operatorname{sen} \omega t = I_m \operatorname{sen} \omega t$$

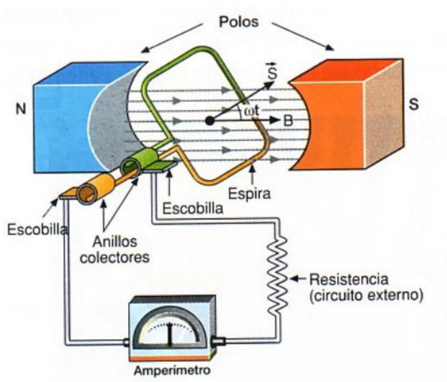
Estas corrientes eléctricas en las que la intensidad varía entre dos valores máximos (uno positivo y otro negativo) se llaman **corrientes alternas**.

5- Los resultados habrían sido diferentes si se hubiera empezado en la posición B. En este caso, la f.e.m. inducida sería

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \varepsilon_m \cos \omega t$$

ya que la posición B está desfasada 90 grados respecto de la posición A. Dependiendo del texto de Física que se utilice aparecen expresiones como las anteriores que dependen de la función seno o de la función coseno.

6- Alternador. Es el nombre que recibe un generador de corriente alterna.



En un esquema básico de un alternador el imán que genera el campo magnético se denomina inductor y la bobina en la que se induce la f.e.m. se denomina inducido. Los dos extremos de hilo conductor del inducido se conectan a unos anillos colectores que giran junto con la bobina. Las escobillas, que suelen ser de grafito, están en contacto permanente, mediante fricción, con los anillos colectores y transmiten la tensión eléctrica producida a los bornes del generador en donde puede conectarse a un circuito exterior.

Por lo general, en los alternadores de las centrales eléctricas las bobinas inducidas están fijas y son las bobinas inductoras (imanes inductores) los que se mueven. De esta manera o son necesarios ni anillos colectores ni escobillas.

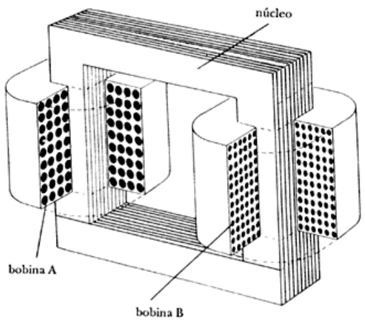
7- Una magnitud a tener en cuenta en las corrientes alternas es la frecuencia de dicha corriente. Se trata, claro está, de la frecuencia de giro de las bobinas en los alternadores. En Europa la frecuencia de la corriente alterna es de 50 Hz (giro de bobinas con un periodo de 0,02 s, es decir, 50 r.p.s o 3000 r.p.m.). En Estados unidos la frecuencia de la corriente es de 60 Hz.

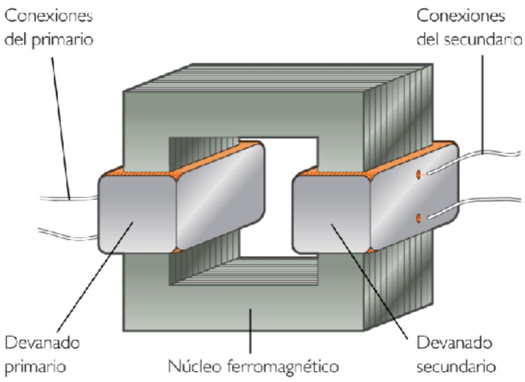
8- La dinamo es una modificación de un alternador para poder general corrientes continuas. Para conseguir esto se sustituye los anillos colectores por un cilindro metálico compuesto de dos mitades aisladas entre sí y conectadas cada una a un extremo de hilo conductor de la bobina. Esta pieza es el conmutador, ya que en cada media vuelta cambia la polaridad del generador de tal forma que la tensión que llega a los bornes a través de las escobillas tiene siempre el mismo signo y al conectarlo al circuito exterior produce una corriente continua.

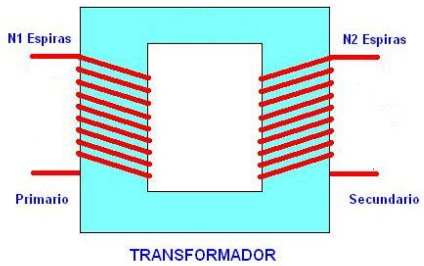
4.2.- Transformadores

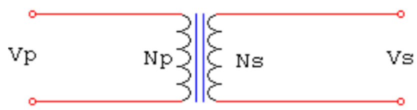
Son aparatos destinados a variar el voltaje y la intensidad de las corrientes alternas fundamentadas en la inducción magnética.

Descripción: un transformador tiene dos bobinados, uno llamado primario y otro secundario. Estas dos bobinas están arrolladas a un mismo núcleo de hierro. El bobinado primario (P) es donde se aplica la f.e.m. alterna exterior. El bobinado secundario (S) es donde aparece ya transformada la corriente alterna.









Funcionamiento: Al circular por el bobinado primario una corriente alterna, se genera un campo magnético variable que provoca una variación del flujo magnético en las espiras del secundario. Esta variación de flujo se debe a que la corriente alterna tiene, como hemos visto, una intensidad variable lo cual provoca un campo magnético variable.

El núcleo de hierro hace que la permeabilidad magnética sea muy alta y, por tanto, los campos magnéticos generados son muy intensos.

La variación del flujo en el bobinado secundario da lugar a una corriente alterna inducida cuya frecuencia es la misma que la frecuencia de la corriente alterna inductora del primario.

La f.e.m. en el bobinado secundario es

$$\varepsilon_s = -N_s \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde N_s es el número de espiras del bobinado.

La f.e.m. en el bobinado primario es

$$\varepsilon_p = -N_p \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde N_p es el número de espiras del bobinado primario.

La presencia del núcleo de hierro evita la dispersión del flujo magnético ya que al hacer el campo magnético muy intenso las líneas de fuerza estarán muy juntas. Puede aceptarse que la variación del flujo magnético es igual en ambos casos por lo que, dividiendo miembro a miembro las ecuaciones anteriores se obtiene

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

al cociente $\frac{N_s}{N_p}$ se le llama razón de transformación.

Si $\varepsilon_p > \varepsilon_s$ el transformador se llama reductor o transformador de baja. En estos transformadores el número de espiras de primario es mayor que el número de espiras del secundario. La razón de transformación es superior a la unidad.

Si $\varepsilon_p < \varepsilon_s$ el transformador se llama elevador o transformador de alta. En estos transformadores el número de espiras de primario es menor que el número de espiras del secundario. La razón de transformación es inferior a la unidad.

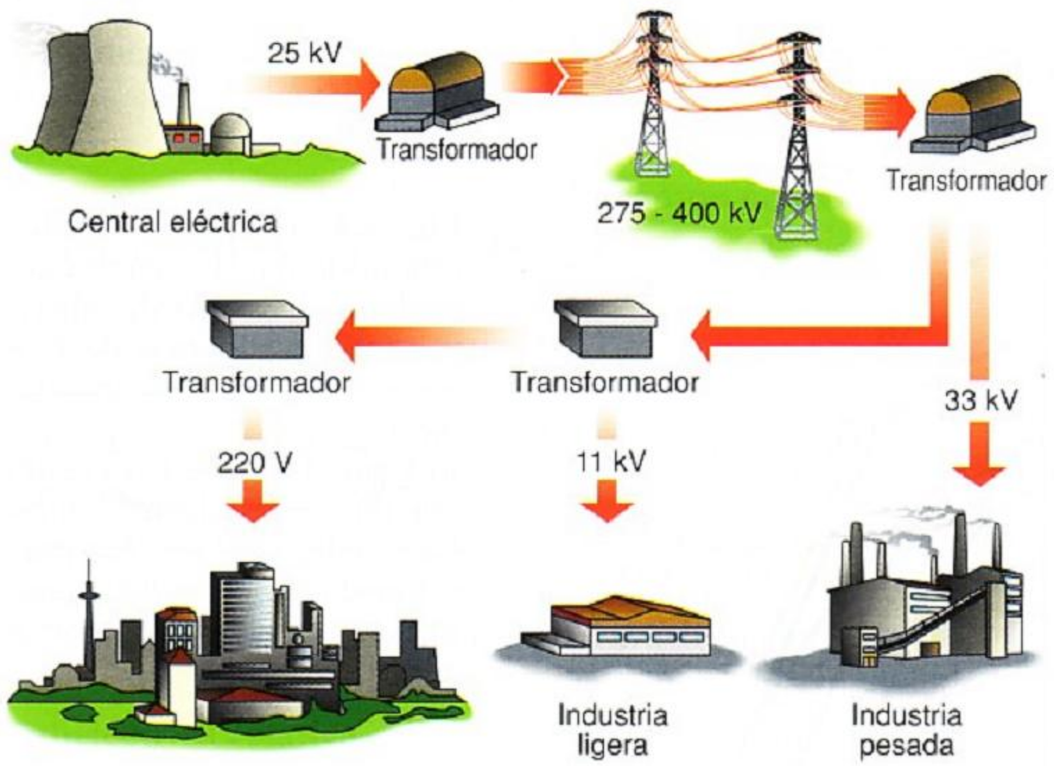
Se define la potencia máxima de una corriente alterna, en watios, como el siguiente producto:

$$P = \varepsilon_m \cdot I_m$$

Si un transformador no consume energía (idealmente es así), entonces la potencia de entrada del primario será igual a la potencia de salida del secundario, luego, en valores máximos,

$$\varepsilon_p \cdot I_p = \varepsilon_s \cdot I_s$$

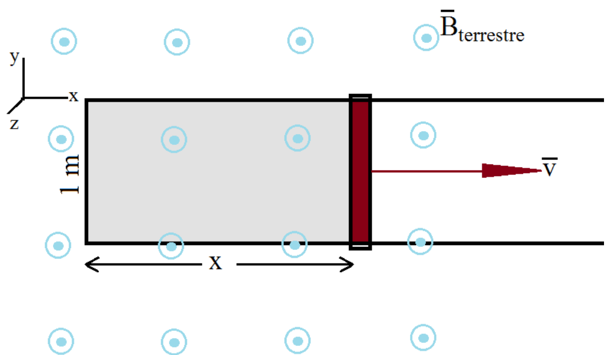
Los transformadores hacen posible que la energía eléctrica se pueda transportar en líneas de alta tensión y baja intensidad de corriente. Las estaciones transformadoras situadas cerca de los núcleos de consumo convierten de nuevo, de acuerdo con la anterior expresión, la corriente a menor tensión y mayor intensidad con poca pérdida de potencia. Interesa realizar el transporte a baja intensidad (y alto voltaje) porque se reducen las pérdidas en forma de calor por efecto Joule a largo del trayecto que separa las centrales eléctricas de las zonas donde se consume la energía eléctrica.



Problemas resueltos.

1) Los rieles de una vía férrea están separados un metro y se encuentran aislados eléctricamente uno del otro. Un tren, que pasa sobre los rieles a 100 km/h, establece una conexión eléctrica entre ellos. Si el campo magnético terrestre tiene una componente vertical de 0,2 gauss, calcula la d.d.p. que existe entre las ruedas del tren que conectan los dos rieles.

La situación es equivalente a una espira con uno de sus lados móviles, tal como se observa en la figura.



La expresión del flujo magnético es

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

donde: B es, en este caso, el campo magnético terrestre

$$B = 0{,}2\ gauss \cdot \frac{10^{-4}\ Tesla}{1\ gauss} = 2 \cdot 10^{-5}\ T$$

Para el sistema de referencia elegido (ver figura) y, según se indica en el enunciado, la dirección y sentido del campo magnético es el eje z en su sentido positivo. Por tanto,

$$\vec{B} = 2 \cdot 10^{-5}\,\vec{k}\quad (T)$$

S es la superficie que va barriendo el tren (zona sombreada en la figura). Esta superficie va cambiando con el tiempo y, por tanto, hace variar el flujo magnético. Su valor, en función del tiempo es,

$$S = 1 \cdot x = v \cdot t = 100 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot t = 27{,}78 \cdot t$$

Esta superficie define un vector, $\vec{S}$, cuya dirección es perpendicular al plano de la misma y cuyo sentido es tal que el ángulo que forme con el campo magnético sea mínimo. Este ángulo, α, es en este caso de 0 grados. Por tanto, el vector superficie tiene la misma dirección y sentido que el campo magnético y podemos poner,

$$\vec{S} = 27{,}78 \cdot t \cdot \vec{k}$$

El flujo magnético será entonces,

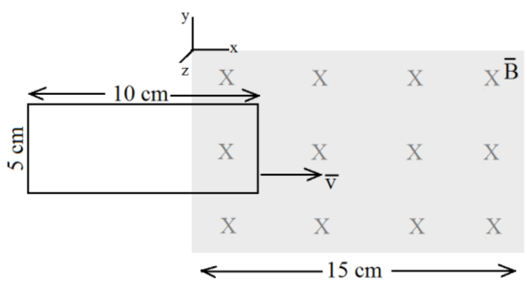
$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 27{,}78 \cdot t \cdot \cos 0 = 5{,}56 \cdot 10^{-4} \cdot t\ \ (Wb)$$

Como vemos, el flujo magnético es variable pues depende del tiempo. Se establece por tanto entre las ruedas del tren una d.d.p. cuyo valor viene dado por la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(5{,}56 \cdot 10^{-4} \cdot t)}{dt} = -5{,}56 \cdot 10^{-4}\ V$$

2) Una espira rectangular de 5 cm de anchura y longitud 10 cm, se introduce a una velocidad constante de 2 m/s en una región de espesor 15 cm donde existe un campo magnético uniforme de intensidad 0,2 Wb·m^{-2}. La espira penetra en el campo de forma que su vector superficie y el vector campo tienen la misma dirección y sentido. Calcular: a) el flujo que atraviesa la espira cuando hay una tercera parte ya ha entrado en el campo; b) el valor de la f.e.m. inducida cuando la espira está entrando en el campo; c) el valor de la f.e.m. inducida cuando la espira está totalmente dentro del campo; d) el valor y sentido de la intensidad de corriente inducida mientras la espira está entrando si la resistencia de la misma es de 20 Ω.

La situación, mientras la espira está entrando en el campo viene representada en la siguiente figura,



a) La expresión del flujo magnético es

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

donde: B es el campo magnético, cuyo módulo es

$$B = 0{,}2\ Wb \cdot m^{-2} = 0{,}2\ T$$

Para el sistema de referencia elegido (ver figura), la dirección y sentido del campo magnético es el eje z en su sentido negativo. Por tanto,

$$\vec{B} = -0{,}2\ \vec{k} \quad (T)$$

S es la superficie que va penetrando en el campo. Esta superficie va cambiando con el tiempo y, por tanto, hace variar el flujo magnético. Su valor, cuando la espira ha penetrado 1/3 es

$$S = 5 \cdot \frac{10}{3} = = 16{,}7\ cm^2 = 16{,}7 \cdot 10^{-4}\ m^2$$

Esta superficie define un vector, $\vec{S}$, cuya dirección es perpendicular al plano de la misma y cuyo sentido es tal que el ángulo que forme con el campo magnético sea mínimo. Este ángulo, α, es en este caso de 0 grados. Por tanto, el vector superficie tiene la misma dirección y sentido que el campo magnético y podemos poner,

$$\vec{S} = -5 \cdot 10^{-4} \cdot \vec{k}$$

El valor del flujo será,

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha = 0{,}2 \cdot 16{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0 = 3{,}34 \cdot 10^{-4}\ Wb$$

b) Mientras la espira penetra en el campo, el módulo del vector superficie va cambiando con el tiempo según la expresión

$$S = 0{,}05 \cdot x = 0{,}05 \cdot v \cdot t = 0{,}05 \cdot 2 \cdot t = 0{,}1 \cdot t$$

Podemos expresar, por tanto, cómo varía el flujo magnético con el tiempo,

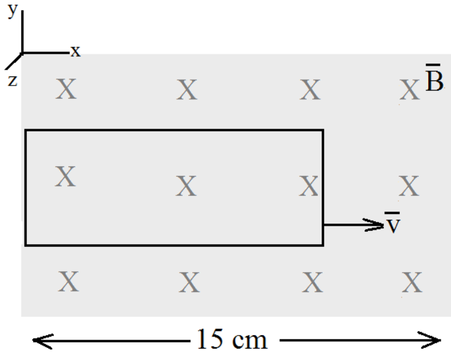
$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha = 0{,}2 \cdot 0{,}1 \cdot t \cdot \cos 0 = 0{,}02 \cdot t \ \ (Wb)$$

Observemos como el flujo magnético va aumentando con el tiempo mientras la espira está penetrando en el campo magnético inductor.

Al variar el flujo magnético, se produce en la espira una corriente inducida debido a la existencia de una f.e.m. inducida cuyo valor viene dado por la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(0{,}02 \cdot t)}{dt} = -0{,}02\ V$$

c) Cuando toda la espira está dentro del campo no hay posibilidad de variación del flujo magnético (B, S y α son constantes). La f.e.m. inducida cesa y, por tanto, la corriente inducida cesa.

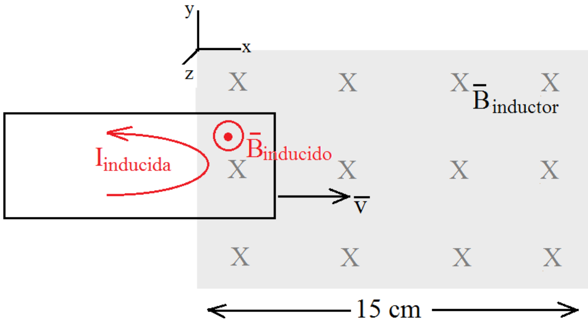


d) La intensidad de la corriente inducida se puede determinar (su valor) aplicando la ley de Ohm a la f.e.m. inducida,

$$\varepsilon = I \cdot R \quad \rightarrow \quad I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0{,}02}{20} = 10^{-3}\ A$$

El sentido de la corriente inducida se puede determinar a partir de la ley de Lenz: la corriente inducida genera un campo magnético inducido cuyos efectos se oponen a que el flujo magnético aumente (mientras la espira está penetrando en el campo magnético).

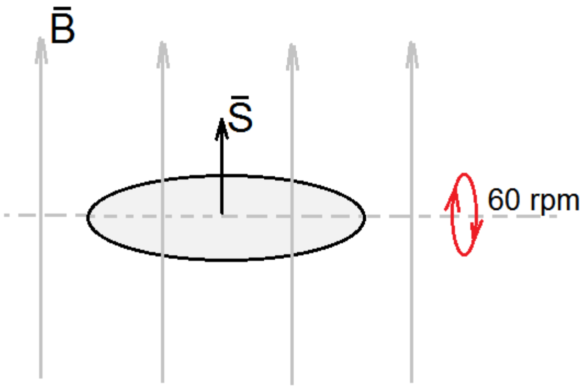
Por tanto, el campo magnético inducido debe tener sentido contrario al campo magnético inductor. Según el sistema de referencia elegido, su sentido es el positivo del eje z.



El sentido del campo magnético en el interior de una espira (su centro) viene determinado por el de avance de un sacacorchos que gire según lo haga la intensidad de corriente que pasa por la espira. El sentido de la corriente inducida es el contrario al de la agujas del reloj para el sistema representado en la figura adjunta.

3) Una espira circular de 5cm de radio, inicialmente horizontal, gira a 60 r.p.m. en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético vertical de 0,2 T. a) Dibuje en una gráfica el flujo magnético a través de la espira en función del tiempo entre los instantes t = 0 y t = 2 s e indique el valor máximo del flujo; b) Escriba la expresión de la fuerza electromotriz inducida en la espira en función del tiempo e indique su valor en el instante t = 1 s.

La situación en el instante inicial viene representada en la siguiente figura:



a) El flujo magnético viene dado por la expresión:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

Donde B es el módulo del campo magnético que, según el enunciado, tiene un valor de 0,2 T

S es el módulo del vector superficie definido como un vector perpendicular a la superficie de la espira cuyo sentido forma un ángulo α con el vector campo. El módulo del vector superficie es

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0{,}05^2 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\pi \ m^2$$

El ángulo inicial que forma el vector superficie con el vector campo es de cero grados. A partir de este momento si la espira empieza a girar a 60 rpm el ángulo irá variando según la siguiente expresión

$$\alpha = \omega \cdot t$$

Donde ω es la velocidad angular y t es el tiempo. La velocidad angular en las unidades adecuadas es,

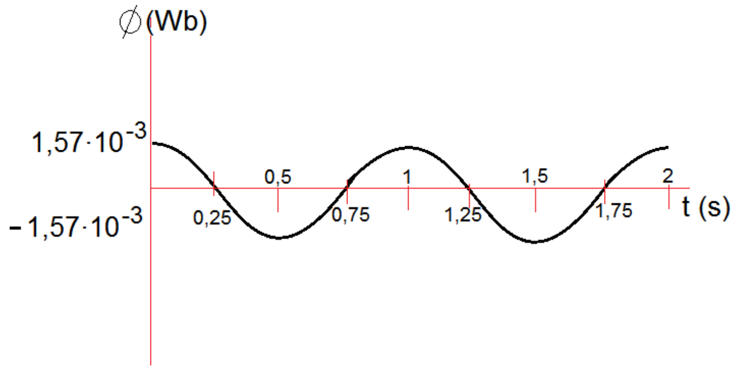
$$\omega = 60 \cdot \frac{2\pi}{60} = 2\pi \ rad/s$$

Por tanto, el flujo varía con el tiempo según la siguiente expresión:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha = B \cdot S \cdot \cos\omega t$$

$$\phi = 0{,}2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}\pi \cdot \cos 2\pi t = 1{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 2\pi t \quad (Wb)$$

La representación de la gráfica de la variación del flujo desde el instante inicial hasta los dos segundos será la siguiente:



Como se puede observar, el valor máximo del flujo es

$$\phi = 1{,}57 \cdot 10^{-3} \, Wb$$

b) Como el flujo magnético está variando de forma periódica con el tiempo, en la espira se genera una corriente inducida. La fuerza electromotriz de esta corriente viene dada por la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi}{dt}$$

donde N es, en este caso, 1. Como tenemos la variación del flujo magnético en función del tiempo, podemos derivar:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{d(1{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 2\pi t)}{dt}$$

$$\varepsilon = 1{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot \text{sen}\,(2\pi t) = 9{,}86 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}\,(2\pi t)$$

Cuando ha transcurrido un segundo la f.e.m. inducida es

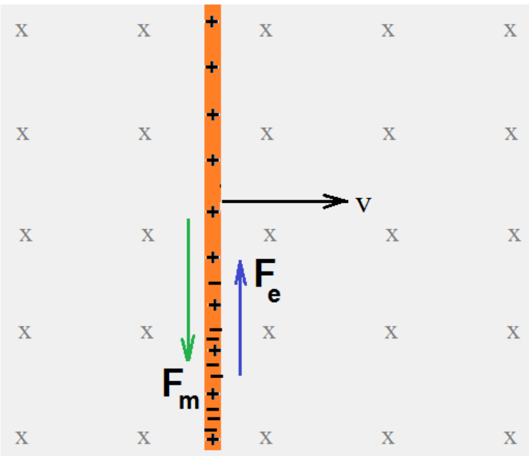
$$\varepsilon_{1\,s} = 9{,}86 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}\,(2\pi) = 0$$

Como se puede ver en la anterior gráfica que representa la variación del flujo en función del tiempo, se cumple que la f.e.m. inducida es mínima cuando el flujo es máximo.

4) Un alambre de cobre de 15 cm de longitud está situado perpendicularmente a un campo magnético de 0,5 T y se mueve perpendicularmente a él con una velocidad de 2 m/s. Calcula diferencia de potencial que se establece entre los extremos del alambre.

Este problema se puede realizar con el mismo planteamiento que el realizado en el problema 1, pág. 16, es decir, se puede considerar que el alambre forma parte de una espira móvil y determinar la f.e.m. inducida en la espira.

Se plantea aquí una versión alternativa basada en la explicación a la experiencia de Henry (pág. 7).



El movimiento del alambre en el campo magnético hace que se establezca una diferencia de potencial entre sus extremos debido a que algunos electrones del alambre se desplazan hacia uno de sus extremos al sufrir una fuerza magnética.

$$\vec{F}_m = q \cdot (\vec{v} \; x \; \vec{B})$$

donde q es aquí la carga del electrón, v es la velocidad del alambre y B la intensidad del campo magnético. Para la situación representada en la figura adjunta la fuerza magnética desplaza algunos electrones hacia la parte inferior del alambre. Esta separación de cargas tiene lugar hasta que se alcanza un equilibrio pues también se establece una fuerza eléctrica de sentido contrario a la magnética sobre cada electrón desplazado debido a la atracción eléctrica que sufre respecto del extremo positivo del alambre. Por tanto, en el equilibrio

$$F_e = F_m$$

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } 90$$

$$E = v \cdot B$$

En esta situación la diferencia de potencial entre los extremos del alambre es máxima y se puede calcular si se considera que la situación en el alambre es similar a la de un condensador:

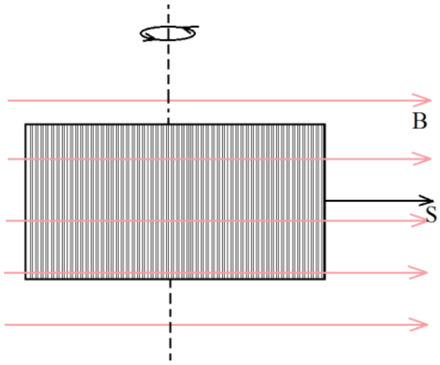
$$\Delta V = E \cdot d$$

donde d es la longitud del alambre. En definitiva,

$$E = v \cdot B \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta V}{d} = v \cdot B \quad \rightarrow \quad \Delta V = v \cdot B \cdot l$$

$$\Delta V = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}15 = 0{,}15 \; V$$

5) Una bobina de 100 espiras, de 200 cm^2 cada una, gira con una velocidad constante de 300 rpm en el interior de un campo magnético uniforme de 0,5 T. Inicialmente el vector superficie de la bobina y el campo coinciden en dirección y sentido. Halla la f.e.m. inducida cuando la espira ha girado 90 grados.



La figura adjunta representa la situación en el instante inicial, cuando la dirección y sentido del campo magnético y del vector superficie de las espiras de la bobina coinciden. Empezaremos por determinar el flujo magnético en este instante:

$$\phi_o = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos 0$$

donde B es el módulo de la inducción magnética, 0,5 T, y S es la superficie de una espira, 200 cm^2. Por tanto,

$$\phi_o = 0{,}5 \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 0{,}01\, Wb$$

Supongamos ahora que la espira ha girado 90 grados según el eje que se indica en la figura. Ahora el flujo magnético se anula ya que el vector superficie y el vector campo magnético forman un ángulo de 90 grados:

$$\phi_{90} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos 90 = 0$$

Por tanto, hay una variación de flujo magnético y, en consecuencia, una fuerza electromotriz inducida en la espira. El valor de esta f.e.m. viene dado por la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -N\, \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde N es el número de espiras de la bobina y Δt el tiempo transcurrido en el giro realizado. Este tiempo lo podemos saber a partir del dato de la velocidad de giro de la bobina pues un giro de 90 grados equivale a un cuarto del periodo de rotación:

$$\omega = 300 \cdot \frac{2\pi}{60} = 10\pi \frac{rad}{s} \quad \rightarrow \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \rightarrow \quad T = \frac{2\pi}{10\pi} = 0{,}2\, s$$

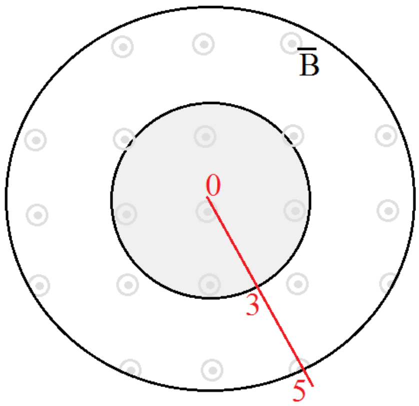
$$\Delta t = \frac{T}{4} = \frac{0{,}2}{4} = 0{,}05\, s$$

En definitiva,

$$\varepsilon = -N\, \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -100 \cdot \frac{(0 - 0{,}01)}{0{,}05} = 20\, V$$

6) Un campo magnético uniforme está confinado en una región cilíndrica del espacio, de sección circular y radio 5 cm, siendo las líneas de campo paralelas al eje del cilindro (esto puede conseguirse mediante un solenoide cilíndrico por el que pasa una corriente y cuya longitud sea mucho mayor que su diámetro). Si la magnitud del campo varía con el tiempo según la ley B(t) = 5 + 10t (unidades en el S.I.), calcula la fuerza electromotriz inducida en una anilla conductora de radio r, cuyo plano es perpendicular a las líneas de campo, en los siguientes casos:
a) El radio del anillo es 3 cm y su centro está en el eje del cilindro.
b) El radio es 3 cm pero su centro está a un cm del eje.
c) El radio es de 8 cm y su centro está en el eje del cilindro.
d) El radio es 8 cm pero su centro está a un cm del eje.

a) La situación viene representada en la figura adjunta.



El campo magnético es variable pues depende del tiempo. Por tanto, se produce una variación del flujo magnético que atraviesa la espira en cada instante, lo que dará lugar a una fuerza electromotriz inducida en la espira. El valor de esta f.e.m. es, según la ley de Faraday,

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

donde

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

El ángulo que forma el vector superficie, perpendicular a la superficie de la espira, y el vector campo magnético es 0 grados. Por tanto,

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos 0 = (5 + 10t) \cdot S$$

En cuanto a la superficie de la espira,

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0{,}03^2 = 9\pi \cdot 10^{-4}\, m^2$$

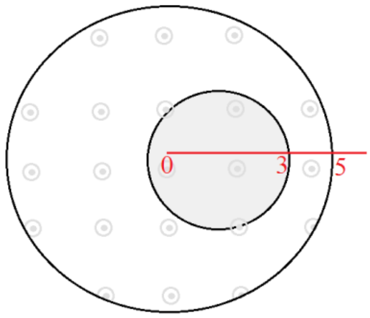
En definitiva,

$$\phi = (5 + 10t) \cdot S = 9\pi \cdot 10^{-4} \cdot (5 + 10t)$$

Si derivamos esta expresión respecto del tiempo obtenemos

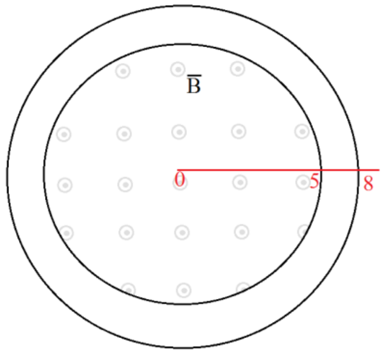
$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -9\pi \cdot 10^{-4} \cdot 10 = -9\pi \cdot 10^{-3} = -0{,}028\, V$$

b) La situación de la espira cambia respecto del caso anterior, ahora la espira no tiene el mismo centro que el anillo pero todavía se encuentra en su totalidad en el interior del campo magnético del anillo. Por tanto, los cálculos realizados en el apartado anterior no cambian pues la superficie atravesada por el campo magnético variable sigue siendo la misma. En definitiva,



$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -9\pi \cdot 10^{-4} \cdot 10 = -9\pi \cdot 10^{-3} = -0{,}028\, V$$

c) La situación ahora es la representada en la figura adjunta. No toda la superficie de la espira se ve afectada por el campo magnético variable. La parte afectada tiene una superficie de



$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0{,}05^2 = 25\pi \cdot 10^{-4}\, m^2$$

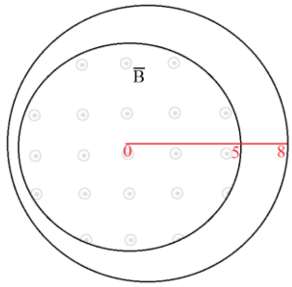
Ahora la variación del flujo sigue la siguiente expresión:

$$\phi = (5 + 10t) \cdot S = 25\pi \cdot 10^{-4} \cdot (5 + 10t)$$

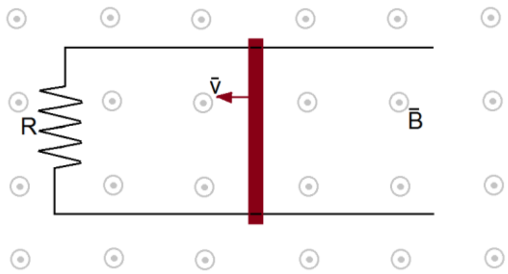
Si derivamos esta expresión respecto del tiempo obtenemos

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -25\pi \cdot 10^{-4} \cdot 10 = -25\pi \cdot 10^{-3} = -0{,}079\, V$$

d) Al igual que en el apartado b, el desplazamiento del centro de la espira respecto del centro del campo magnético no afecta a la superficie de la espira que es atravesada por dicho campo. Por tanto, la fuerza electromotriz inducida sigue siendo de – 0,079 voltios.



7) Una varilla conductora de 25 cm de longitud se desliza paralelamente a sí misma con una velocidad de 0,3 m/s sobre un conductor en forma de U y de 10 Ω de resistencia. El conjunto está situado en el seno de un campo magnético uniforme de 0,5 T y perpendicular al círculo formado por los conductores. Si el área del circuito se va haciendo cada vez más pequeña, determina: a) El valor de la f.e.m. inducida; b) El valor y el sentido de la intensidad que recorre el circuito; c) La potencia que suministra la varilla como generador de corriente; d) La energía disipada por la resistencia en 2s; e) El módulo, dirección y sentido de la fuerza que hay que aplicar para mantener la varilla en movimiento; f) El trabajo que realiza esta fuerza para transportar a la varilla a lo largo de 0,6 m.



a) Para un razonamiento de las expresiones que se utilizan véase problema 1.

El flujo magnético que atraviesa la espira que forma la varilla y el conductor varía según la expresión,

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

Donde $B = 0{,}5\, T$

$$S = 0{,}25 \cdot v \cdot t = 0{,}25 \cdot 0{,}3 \cdot t = 7{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot t \quad (m^2)$$

$$\alpha = 0°$$

Por tanto,

$$\phi = 0{,}5 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot t \cdot \cos 0 = 3{,}75 \cdot 10^{-2} \cdot t \quad (Wb)$$

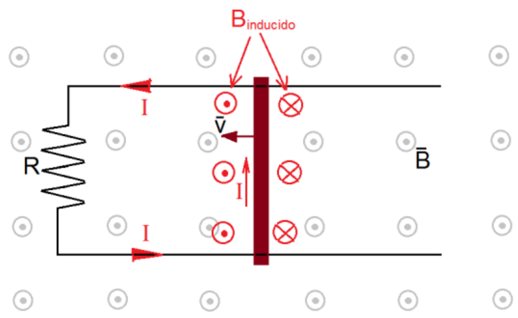
La f.e.m. inducida será

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -3{,}75 \cdot 10^{-2}\ V$$

b) La intensidad de corriente se determina, conociendo la f.e.m. inducida y la resistencia óhmica del circuito, a partir de la ley de Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0{,}0375}{10} = 3{,}75 \cdot 10^{-3}\ A$$

Para determinar su sentido aplicamos la ley de Lenz. Al deslizarse la varilla, el flujo disminuye, por lo que los efectos magnéticos de la corriente inducida se oponen a que dicho flujo disminuya, es decir, el campo magnético inducido debe tener el mismo sentido que el campo magnético inductor. Para que esto ocurra la intensidad inducida circula, en la espira formada, en sentido contrario a las agujas del reloj. Dicho de otra forma, el campo magnético inducido sale tiene (regla de la mano derecha) el mismo sentido que el inductor a la izquierda de la varilla, y tiene sentido contrario al inductor a la derecha de la varilla:



c) La potencia que suministra la varilla como generador es:

$$P = \varepsilon \cdot I = 0{,}0375 \cdot 0{,}00375 = 1{,}41 \cdot 10^{-4}\ W$$

d) La energía disipada en el circuito en 2 s es:

$$W = P \cdot t = 1{,}41 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 2{,}82 \cdot 10^{-4}\ J$$

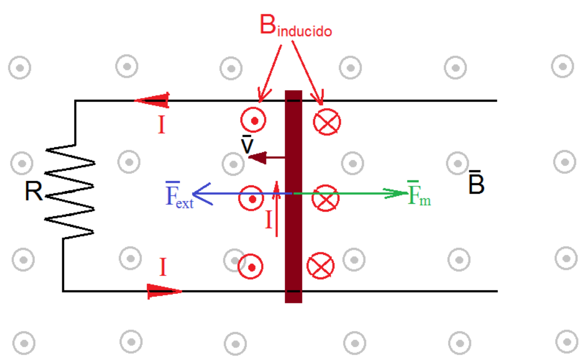
e) Sobre el conductor (la varilla) actúa una fuerza magnética cuya expresión viene dada por la ley de Laplace:

$$\vec{F}_m = I \cdot (\vec{l}\ x\ \vec{B})$$

El módulo de esa fuerza es:

$$F_m = I \cdot l \cdot B \cdot \text{sen}\ 90 = 3{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}5 = 4{,}69 \cdot 10^{-4}\ N$$

La dirección de la fuerza magnética es perpendicular la varilla. Su sentido viene dado por el de avance de un tornillo que gira en el sentido de I a B (regla de la mano izquierda).



Como se ve en la figura adjunta, el sentido de la fuerza magnética se opone a que la varilla se mueva. Para que la varilla se mueva y genere la f.e.m. calculada anteriormente es necesario aplicar una fuerza externa cuya dirección será la misma que la de la fuerza magnética, pero su sentido contrario.

$$F_{ext} = 4{,}69 \cdot 10^{-4}\ N$$

f) El trabajo que realiza esta fuerza externa para transportar la varilla a lo largo de 0,6 m es:

$$W = \vec{F}_{ext} \cdot \Delta\vec{x} = F_{ext} \cdot \Delta x \cdot \cos 0 = \ 4{,}69 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}6 = 2{,}8 \cdot 10^{-4} J$$

8) Una espira se coloca en un campo magnético $\vec{B} = 0{,}1\hat{\imath}\ T$. Halla el flujo a través de la espira si su vector superficie vale $\vec{S} = 5\hat{\imath} + 4\hat{\jmath} - 20\hat{k}\ \ cm^2$.

El flujo magnético viene dado por el producto escalar de los vectores campo magnético y superficie. Por tanto,

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \ (0{,}1\hat{\imath}) \cdot (5\hat{\imath} + 4\hat{\jmath} - 20\hat{k}) \cdot 10^{-4}$$

$$\phi = [(5\hat{\imath} \cdot 0{,}1\hat{\imath}) + (4\hat{\jmath} \cdot 0{,}1\hat{\imath}) - (20\hat{k} \cdot 0{,}1\hat{\imath})] \cdot 10^{-4}$$

Teniendo en cuenta que

$$\hat{\imath} \cdot \hat{\imath} = 1 \cdot 1 \cdot \cos 0 = 1$$

$$\hat{\imath} \cdot \hat{\jmath} \ = 1 \cdot 1 \cdot \cos 90 = 0$$

$$\hat{\imath} \cdot \hat{k} = 1 \cdot 1 \cdot \cos 90 = 0$$

Entonces

$$\phi = 0{,}5 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-5}\ \ Wb$$

Estos apuntes se finalizaron el 14 de abril de 2011
en Villanueva del Arzobispo, Jaén (España).
Realizados por: Felipe Moreno Romero
fresenius1@gmail.com
http://www.escritoscientificos.es