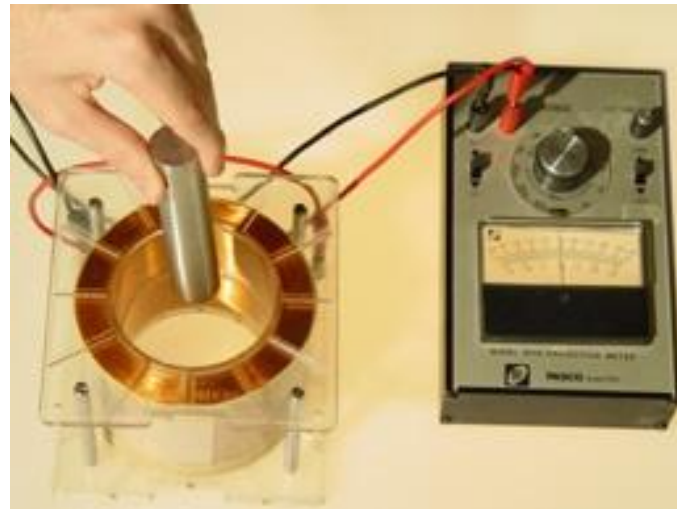
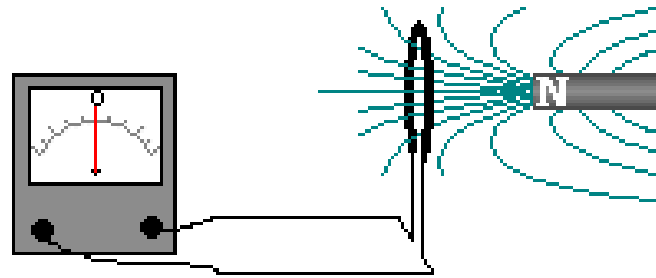


INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La Ley de Faraday



Revisión General

- **Electrostática**

- Movimiento de “ q ” en un campo externo E
- Campo E generado por Σq_i

- **Magnetostática**

- Movimiento de “ q ” e “ I ” en un campo externo B
- Campo B generado por “ I ”

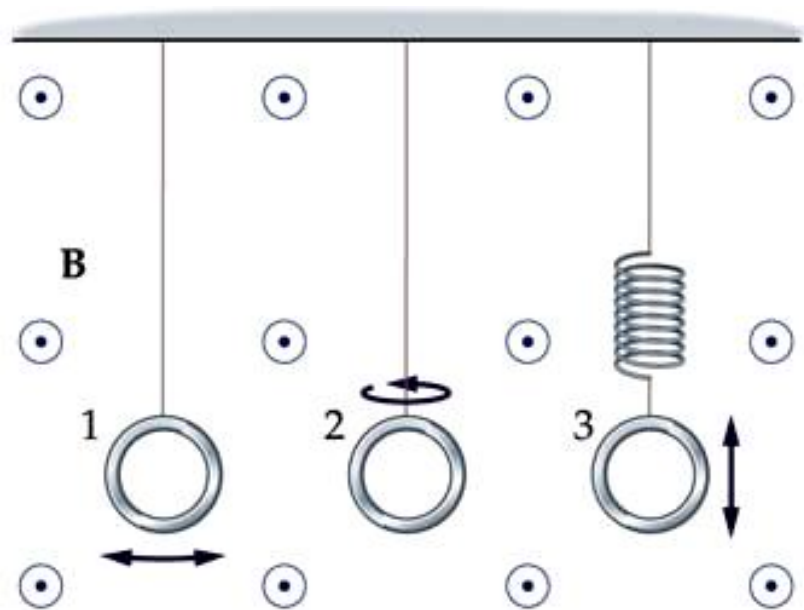
- **Electrodinámica**

- Campo B dependiente del tiempo genera un campo E
 - Circuitos AC, inductores, transformadores, etc.
- Campo E dependiente del tiempo genera un campo B
 - Radiación electromagnética - *luz!*

Prevuelo

Los tres lazos del alambre mostrados en la figura están todos en una región del espacio con un campo magnético constante y uniforme. El lazo 1 se hace pivotar hacia la derecha e izquierda, el lazo 2 rota sobre un eje vertical, y el lazo 3 oscila verticalmente en el extremo de un resorte. ¿Qué lazos tienen un flujo magnético que cambie con tiempo?

- A) loop 1
- B) loop 2
- C) loop 3
- D) loop 1 and 2
- E) loop 2 and 3



Prevuelo:

Ejemplo de Inducción

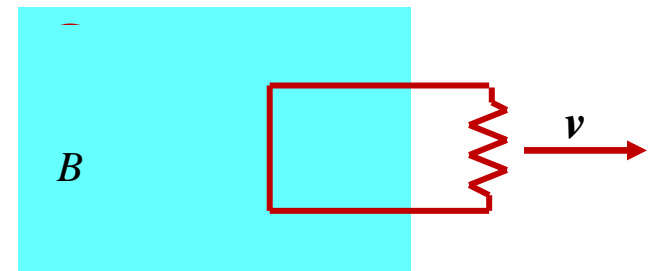
Dentro de la región sombreada, hay un campo B entrando al plano.

Ahora el lazo es jalado a la derecha a velocidad constante v .
– La fuerza de Lorentz dará lugar a:

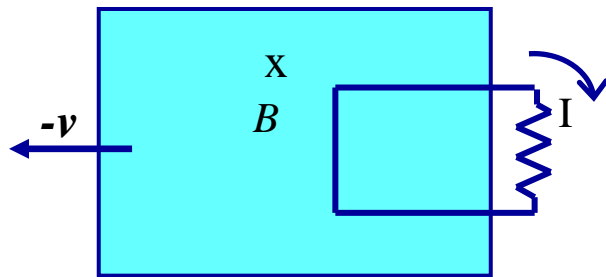
(a) Una corriente horaria

(b) Una corriente antihoraria

(c) No hay corriente, por simetría



Otro Ejemplo de Inducción



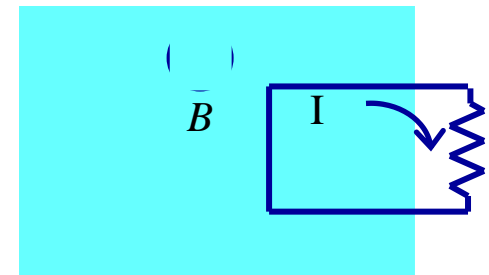
Mueva el campo, no el lazo.

Esta “coincidencia” lo intrigó a Einstein, y eventualmente lo inspiró en la Teoría especial de la relatividad (todo el problema es movimiento *relativo*).

Otro Ejemplo de Inducción

Disminuya la intensidad de B . Ahora *nada se está moviendo,*

!pero se sigue observando una corriente!:



Disminuye $B \downarrow$

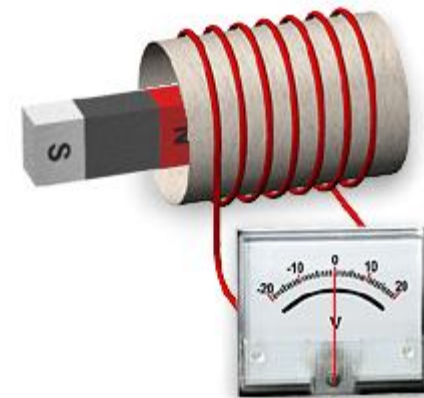
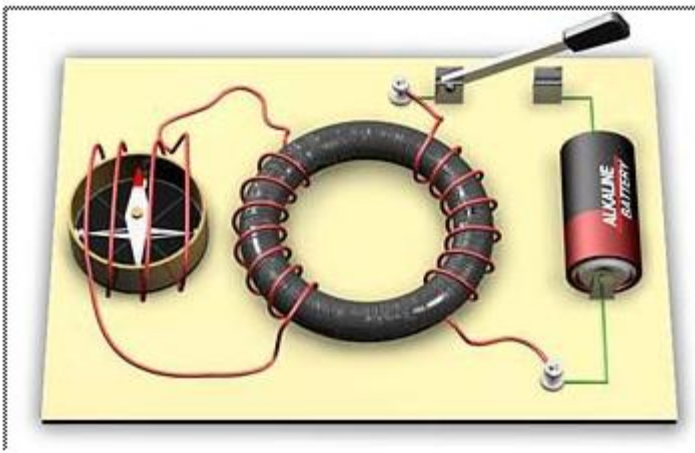
$$I \propto \frac{dB}{dt}$$

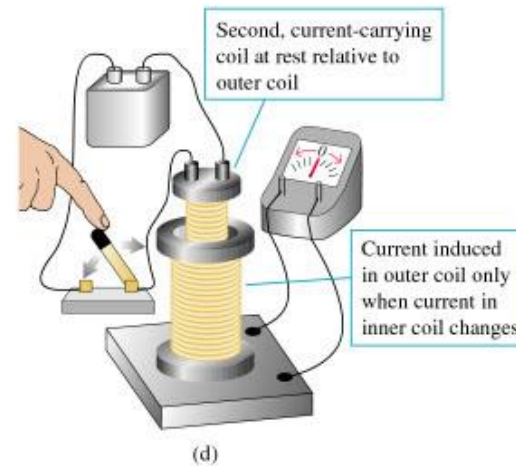
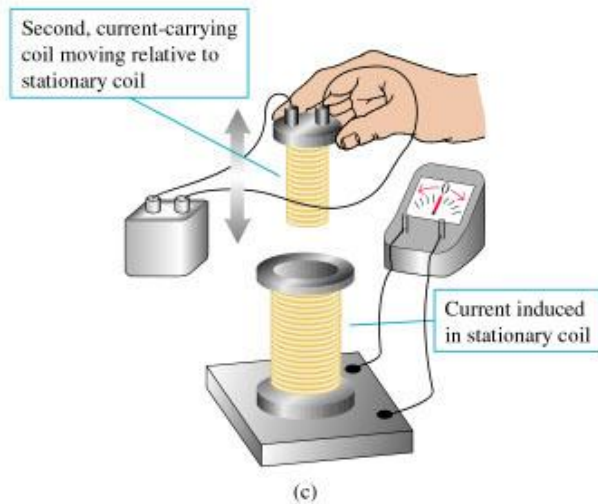
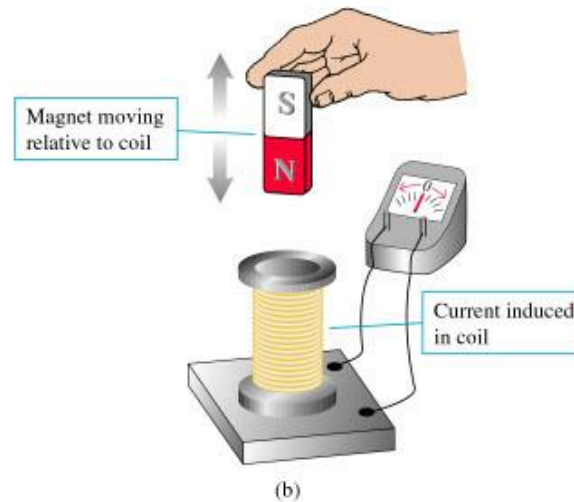
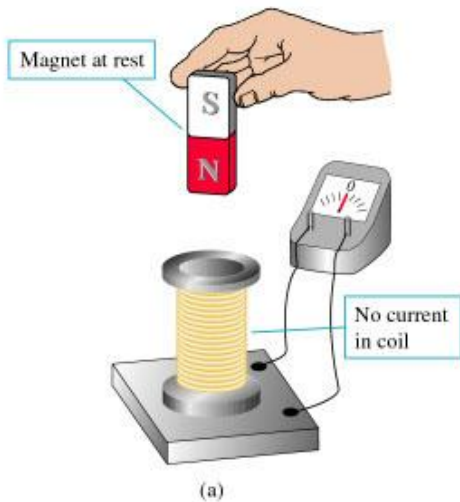
No se preocupe, esto recién empieza!!



LEY DE FARADAY

- Cuando Michael Faraday hizo su descubrimiento de la inducción electromagnética en 1831, realizó la hipótesis de que **un campo magnético cambiante** era necesario para inducir una corriente en un circuito cercano. Para probar su hipótesis el hizo una bobina con papel enrollándola con alambre. Conectó la bobina a un galvanómetro, y moviendo un magneto hacia atrás y adelante dentro del cilindro...





La inducción electromagnética está presente únicamente cuando el flujo cambia en el tiempo



Flujo de Campo Magnético

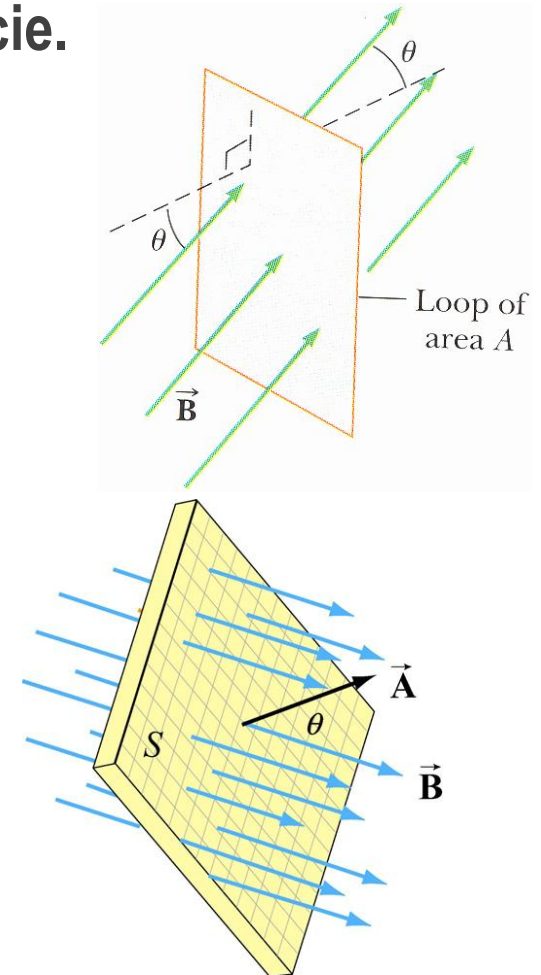
El flujo magnético (ϕ) es una medida del número de líneas de campo pasando a través de un área (A). El área puede ser representada por un vector A perpendicular al plano de la superficie.

- Necesitamos una forma de calcular la **cantidad de campo magnético** que pasa a través del lazo.
- Similar a la definición de flujo eléctrico, definimos el flujo magnético

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

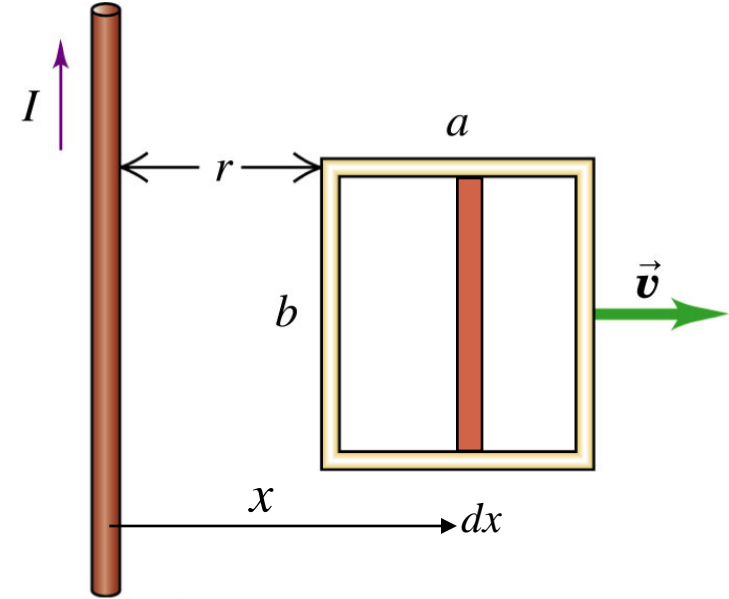
- El flujo magnético es una cantidad escalar.
- En un **campo magnético uniforme**, el flujo magnético puede ser expresado como.

$$\Phi_B = BA \cos \theta$$



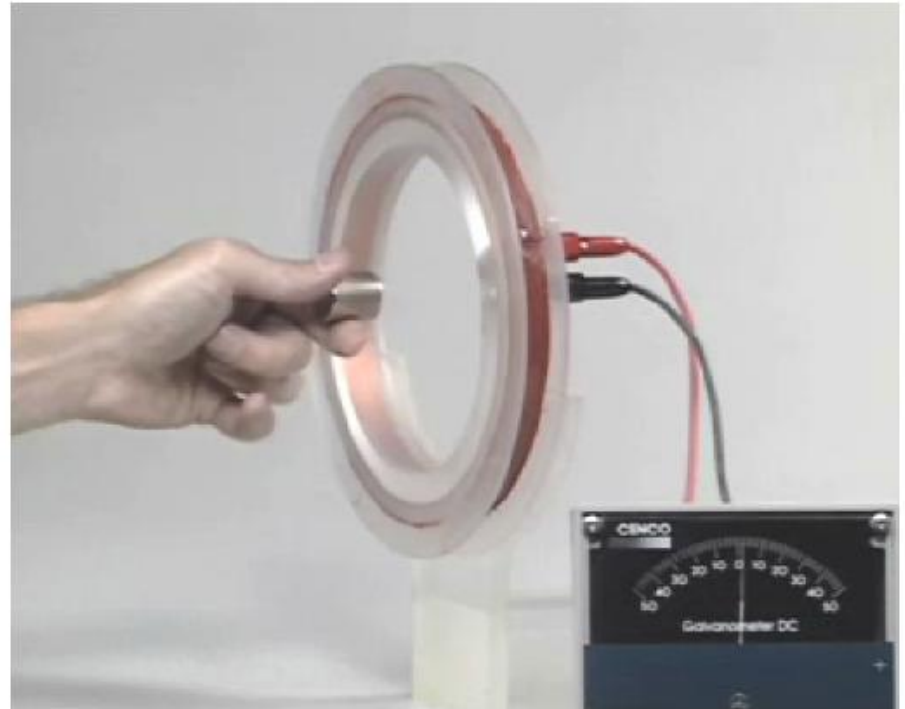
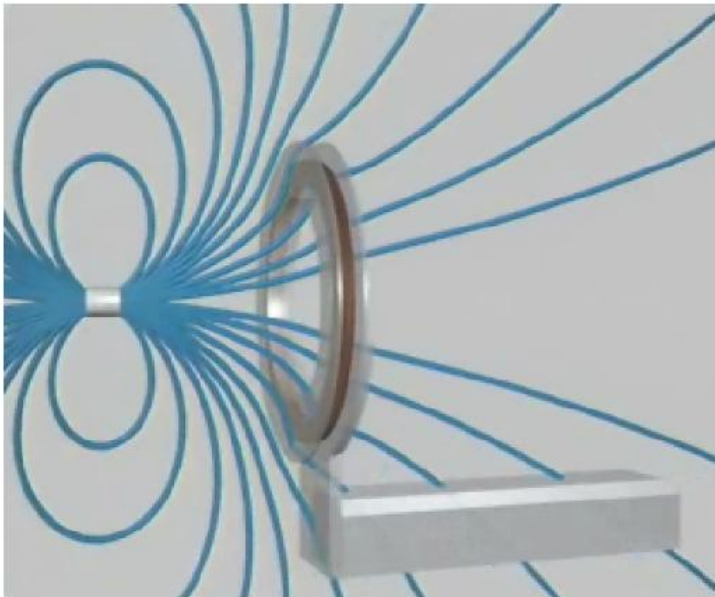
Ejemplo: Determine el flujo magnético a través de la espira en la posición indicada en la figura.

$$\Phi_B = BA \cos \theta$$



Inducción Electromagnética

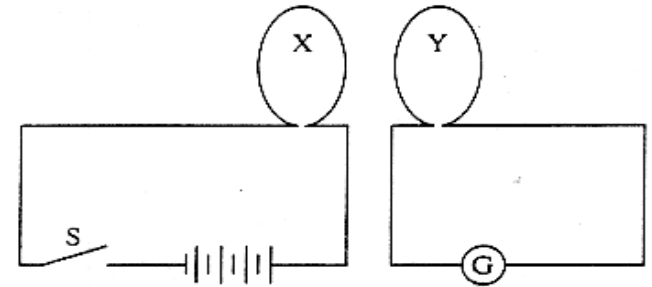
- (a) Cuando no hay movimiento relativo entre el magneto y la espira, el número de líneas a través del lazo es constante, y el galvanómetro no muestra deflexión.



- (b) Al mover el magneto, acercándose o alejándose, se observa la deflexión.

Pregunta de concepto

Dos bobinas X y Y en los circuitos indicados se colocan cerca una de otra. G es un galvanómetro de cero en el centro de escala, y S es un interruptor.



¿Qué le pasará a la aguja del galvanómetro si se cierra el interruptor S, se mantiene cerrado durante cierto tiempo y se abre después?

- A. Se desviará a un lado, permanecerá estable, y regresará a cero.
- B. No se moverá.
- C. Se moverá a un lado y permanecerá allí.
- D. Se desviará a un lado, volverá a cero, luego al otro lado, y finalmente a cero.

Fem Inducida y Corriente

- Un alambre de longitud ℓ se mueve a través de un campo magnético uniforme.
- Se mueve en dirección perpendicular al campo con velocidad constante \mathbf{v} .
- Los electrones sienten la fuerza magnética y migran, creando un campo eléctrico inducido \mathbf{E} .
- Las cargas llegan al equilibrio cuando las fuerzas sobre ellas se cancelan:

$$qE = qvB \quad \text{o} \quad E = vB$$

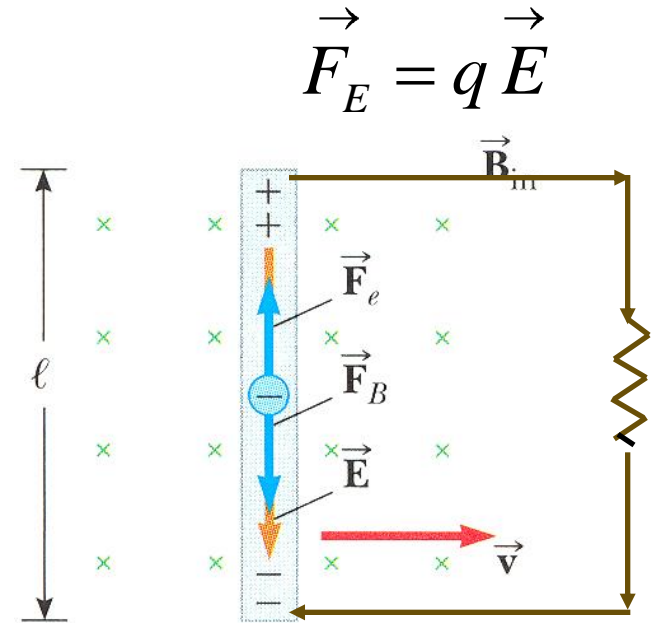
- El campo eléctrico está relacionado con la diferencia de potencial entre los extremos de la barra:

$$V = \mathcal{E} = El = Blv$$

Fem de movimiento
$$\vec{F}_B = q \vec{v} \times \vec{B}$$

- La diferencia de potencial se mantiene entre los extremos de la barra mientras la barra se mantenga en movimiento en el campo \mathbf{B} .

$$\mathcal{E}_{ind} = \frac{W}{q} = \frac{\int \vec{F} \cdot d\vec{l}}{q} = v l B$$

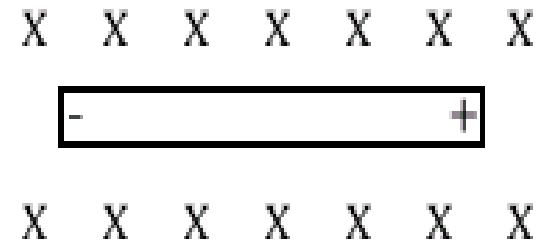


$$\vec{F}_E = q \vec{E}$$

Una corriente es creada, a pesar que no hay una batería en el circuito. Esta corriente es la corriente inducida. Y es generada por una fem inducida.

Pregunta de concepto

Un alambre se mueve a través de un campo magnético dirigido hacia el interior de la página. El alambre experimenta una separación inducida de carga como se muestra. ¿En qué dirección se está moviendo el alambre?



- A. hacia la derecha
- B. hacia la izquierda
- C. hacia fuera de la página
- D. hacia la parte superior de la página.
- E) hacia la parte inferior de la página

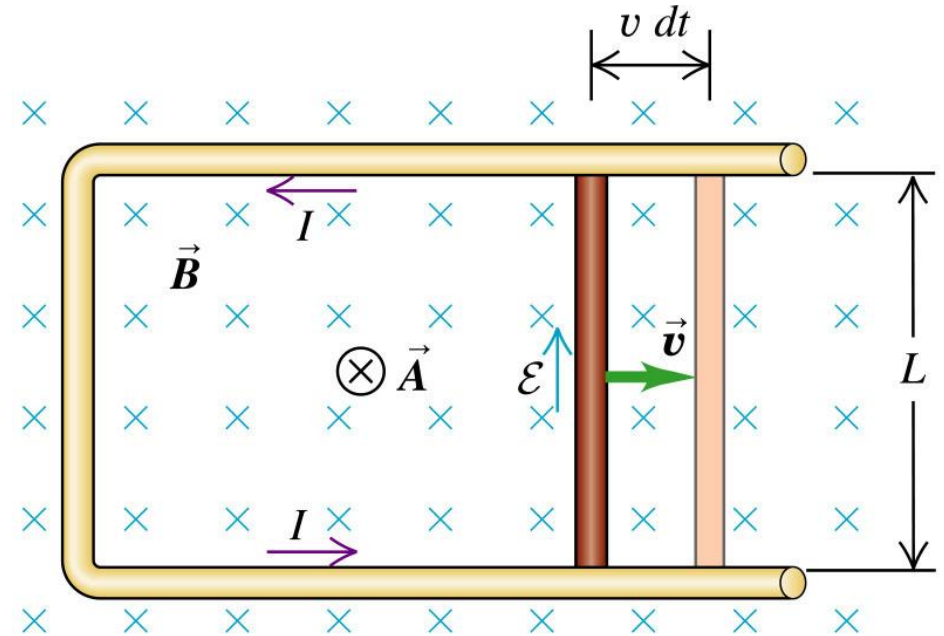
Cálculo de la *fem* de movimiento: Por variación de flujo

*Cálculo alternativo utilizando
la ley de Faraday*

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{Bl dx}{dt}$$

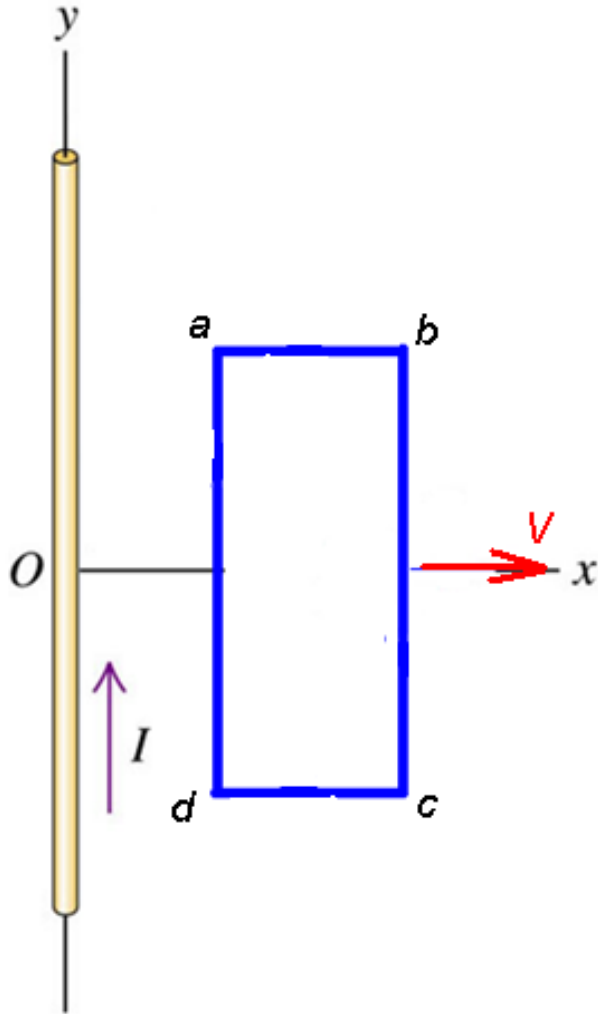
$$\varepsilon = \frac{Bl v dt}{dt}$$

$$\varepsilon = Blv$$



Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

¿En qué tramo(s) de la espira rectangular de la figura, la *fem* inducida vale cero?

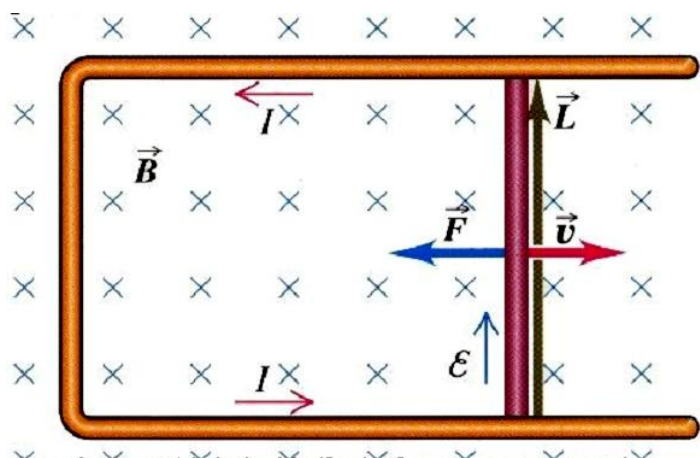


¿Cuál es el valor y en qué dirección apunta la *fem* inducida en el tramo $d-a$?

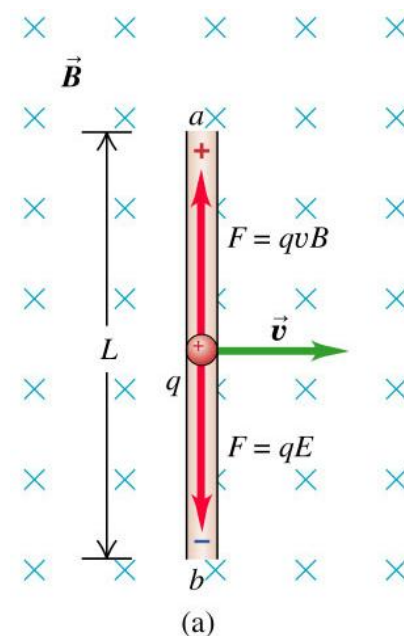
¿En qué dirección circula la corriente inducida en la espira?

Origen de la Corriente Inducida

Si la barra en movimiento forma un circuito cerrado, entonces se producirá una corriente, la que toma el nombre de **corriente inducida**



$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\text{fem inducida}}{\text{resistencia}}$$



$$\varepsilon = Blv$$

La dirección de la corriente es la misma en la que se movería un portador positivo de carga en el alambre

Inducción y Transferencia de Energía

Una barra conductora de longitud ℓ se desliza sobre dos rieles paralelos conductores.

Las cargas libres de la barra sienten la fuerza magnética, produciéndose una corriente inducida I .

Partiendo del flujo magnético y con la ley de Faraday, tenemos

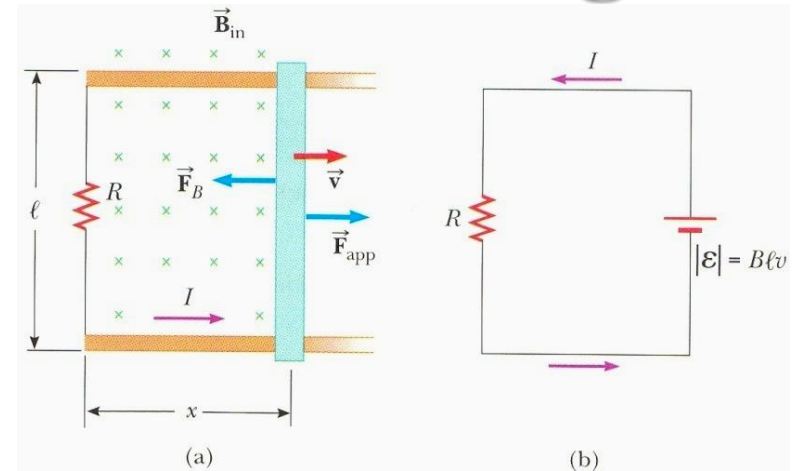
$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{d}{dt}(Blx) = Bl \frac{dx}{dt} = Blv$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{Blv}{R}$$

¿de dónde proviene la energía para generar la corriente?

Origen de la corriente inducida y de la energía disipada por el resistor

$$P = I^2 R = \left(\frac{Blv}{R} \right)^2 R = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$$

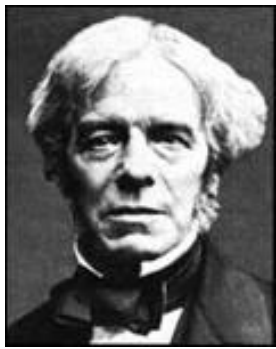


El cambio de energía en el sistema debe ser igual a la transferencia de energía al sistema por el trabajo.

Moviéndose con velocidad constante, La potencia de la fuerza aplicada es

$$F_{app} = F_B = IlB \sin \theta = IlB$$

$$P = F_{app} v = \left(\frac{Blv}{R} \right) lB v = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$$

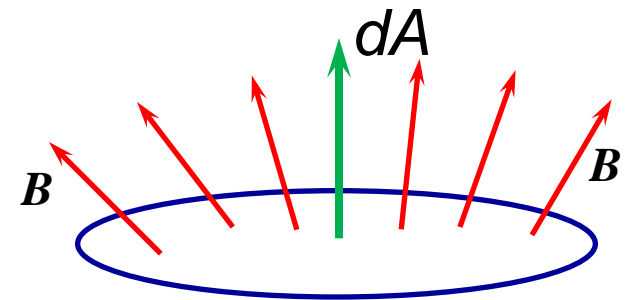
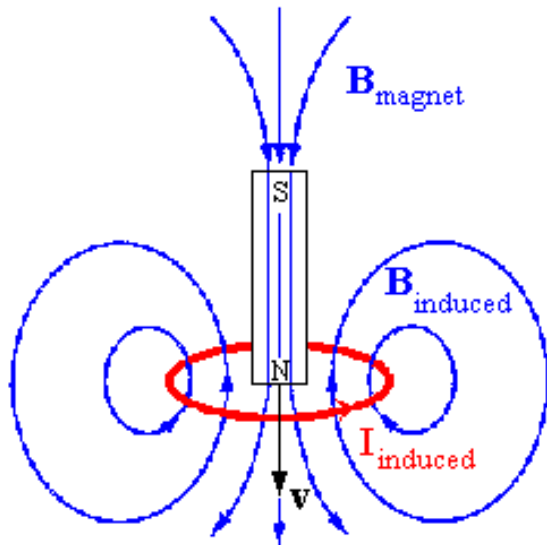


La *fem* inducida y el flujo magnético



La expresión conocida como la ley de Faraday es realmente el resultado del trabajo matemático desarrollado por Maxwell.

¿Cómo determinar el valor de la *fem* inducida cuando el conductor NO se mueve?

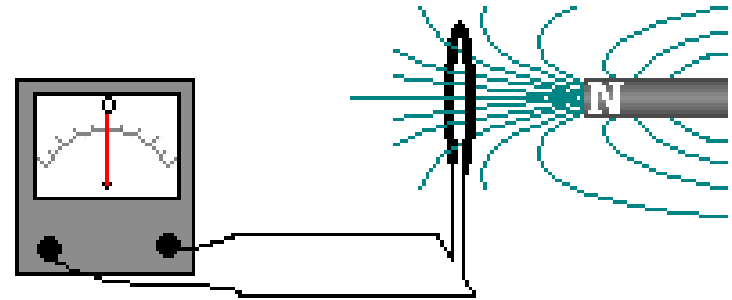


$$\mathcal{E}_{inducida} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

El signo negativo indica que la *fem* inducida aparece oponiéndose a la variación del flujo magnético

¿Qué significa **oponiéndose** a la variación del flujo magnético?

$$\mathcal{E}_{inducida} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

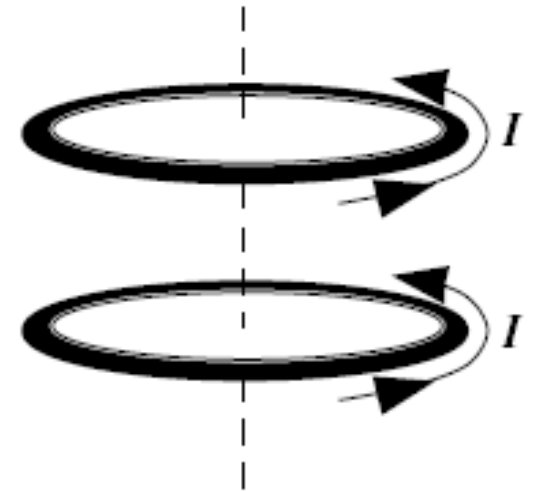


- Si el flujo aumenta, la fem inducida aparecerá en sentido tal que el flujo inducido deberá **restarse** al flujo “externo” para impedir que aumente.
- Si el flujo disminuye, la fem inducida aparecerá en sentido tal que el flujo inducido deberá **sumarse** al flujo “externo” para impedir que disminuya.

Pregunta de concepto

Dos lazos conductores transportan igual corriente I en la misma dirección como se muestra en la figura. Si la corriente en el lazo superior repentinamente cae a cero, ¿qué pasará con la corriente en el lazo de abajo acorde a la ley de Faraday?

- (a) The current will increase.
- (b) The current will decrease.
- (d) The current will also drop to zero.
- (e) The current will reverse its direction.



La ley de Inducción de Faraday: Resumen

- La magnitud de la fem inducida en un lazo conductor es igual a la rapidez de cambio del flujo magnético a través del lazo en el tiempo

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

- Si la bobina consiste de N espiras de la misma área, la fem total inducida en la bobina es dada por

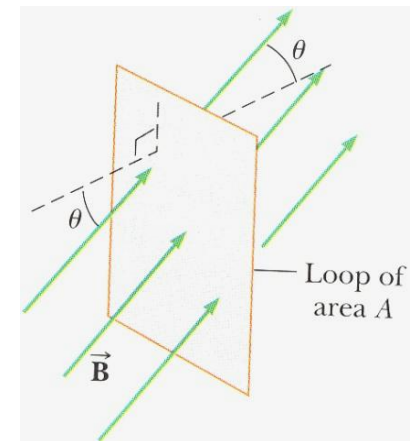
$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- En un campo magnético uniforme, la fem inducida puede ser expresada como

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$

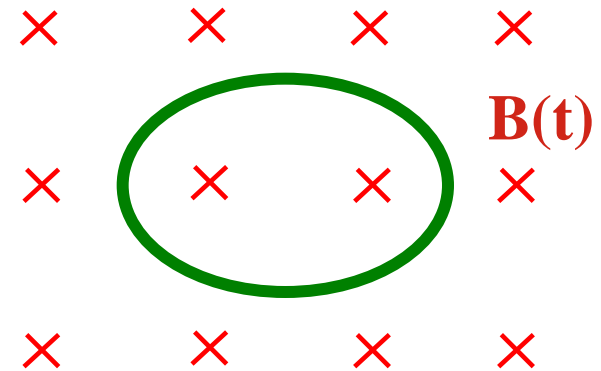
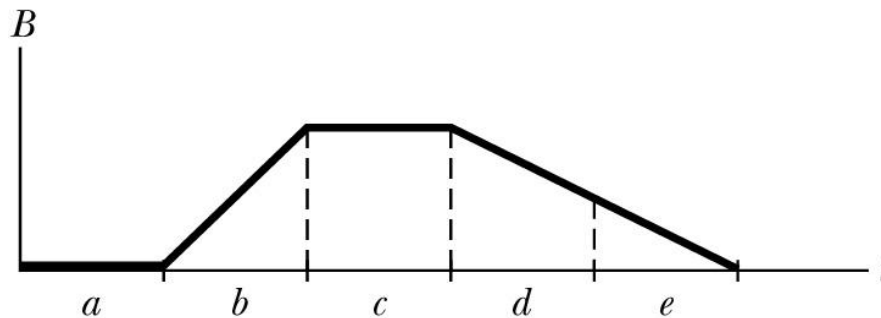
- La *fem* puede ser inducida de diferentes formas:

- La magnitud de B puede cambiar en el tiempo.
- El área encerrada por el lazo puede cambiar en el tiempo
- B y la normal al lazo puede cambiar en el tiempo.
- **Cualquier combinación de las de arriba.**

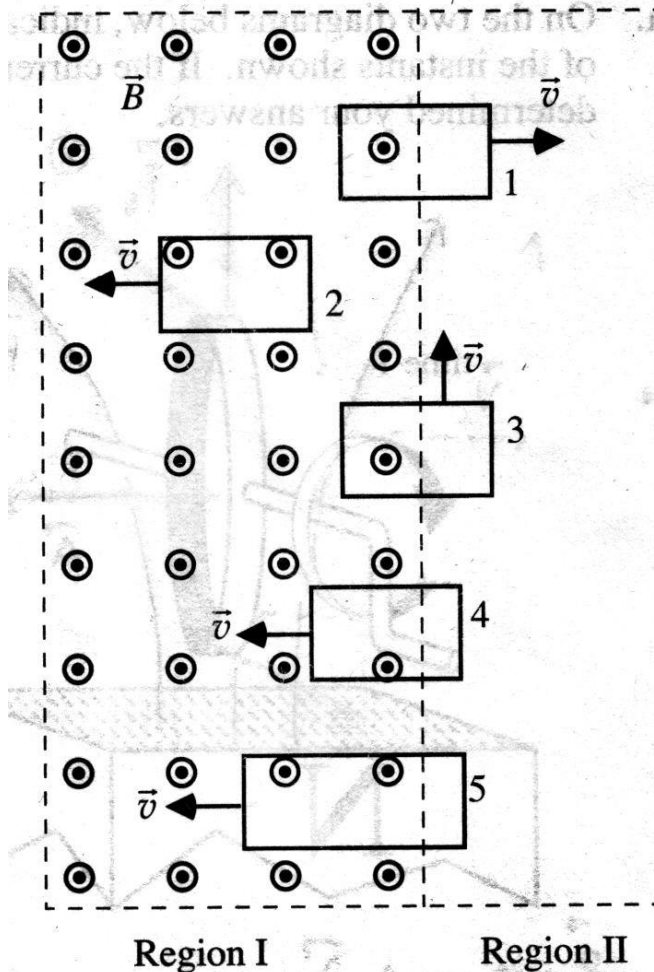


Pregunta de Concepto: Corriente Inducida y *fem*

2. El gráfico da la magnitud $B(t)$ de un campo magnético uniforme que existe a través de un lazo conductor, con la dirección del campo perpendicular al plano del lazo. ¿En qué región del gráfico, la magnitud de la *fem* inducida es máxima?



Las espiras mostradas en la figura se mueven con la misma rapidez.

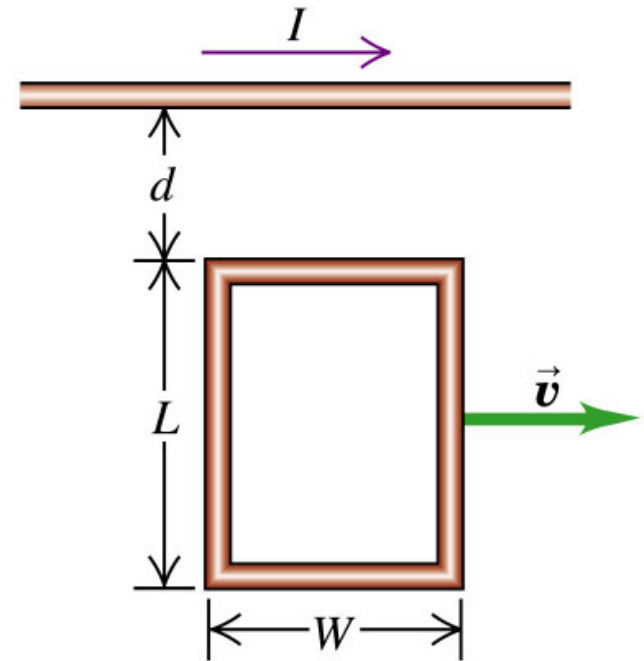


1. ¿En cuál de ellas la *fem* tiene sentido horario?
2. ¿En cuál de ellas la *fem* vale cero?
3. ¿En cuál de ellas la *fem* tiene mayor valor?

Pregunta de concepto

El lazo rectangular de alambre se mueve a la derecha con velocidad constante. Corriente constante I fluye en el alambre recto y muy largo, ambos en el mismo plano.

¿Cuál de las siguientes alternativas sobre la corriente inducida en el lazo es *correcta*?

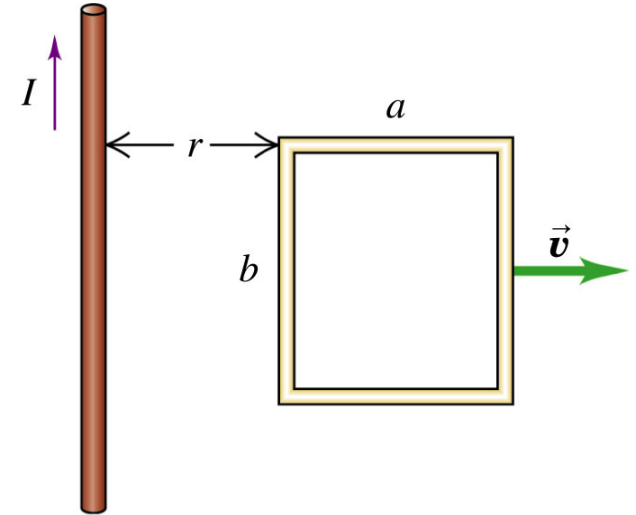


1. La corriente inducida aparece en sentido horario.
2. La corriente inducida aparece en sentido anti-horario.
3. La corriente inducida vale cero

Pregunta de concepto

El lazo rectangular de alambre se mueve a la derecha con velocidad constante. Corriente constante I fluye en el alambre recto y muy largo, ambos en el mismo plano.

¿Cuál de las siguientes alternativas sobre la corriente inducida en el lazo es *correcta*?

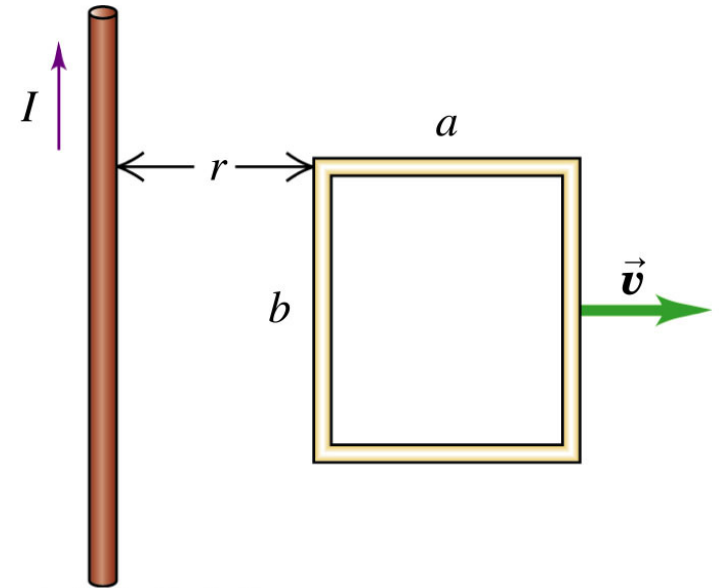


1. La corriente inducida aparece en sentido horario.
2. La corriente inducida aparece en sentido anti-horario.
3. La corriente inducida vale cero

Pregunta de concepto

The rectangular loop of wire is being moved to the right at constant velocity. A constant current I flows in the long wire in the direction shown.

¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre el lado izquierdo (L) y sobre el lado derecho (R) del lazo?

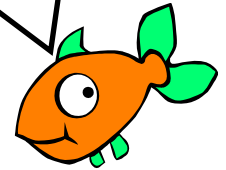


1. L side: force to the left; R side: force to the left
2. L side: force to the left; R side: force to the right
3. L side: force to the right; R side: force to the left
4. L side: force to the right; R side: force to the right
5. none of the above

Observaciones Respecto a la Utilización de la *fem* de Movimiento

$$\varepsilon = Blv$$

¿Cuándo la puedo aplicar?



Esta expresión se aplica a barras moviéndose con **velocidad constante** y **perpendicular a un campo magnético uniforme**. Si la velocidad no es constante o el campo magnético a lo largo de la barra no es uniforme, se podrá diferenciar el resultado anterior para luego integrarlo a lo largo de la barra y obtener el valor de la *fem* total.



Tranquilos, trataré de ser más explícito!!

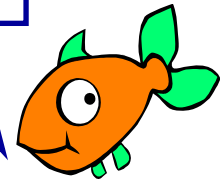


$$\varepsilon = Blv$$

Si la velocidad v no es perpendicular al campo B , hay que multiplicar la expresión por el seno del ángulo formado entre la velocidad y el campo magnético. Esto significa que si la barra se mueve en la misma dirección del campo la *fem* será cero.

$$\varepsilon = Blv \sin \theta$$

θ ángulo
formado
entre v y B !

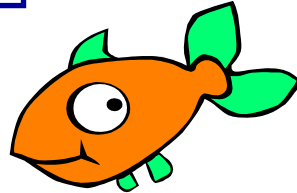


¿Y qué pasa si la velocidad de la barra no es constante o el campo B es variable?



!En este caso v cambia a lo largo de la barra!

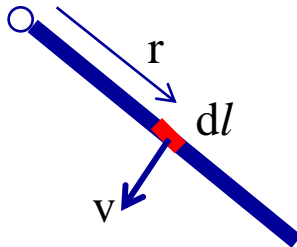
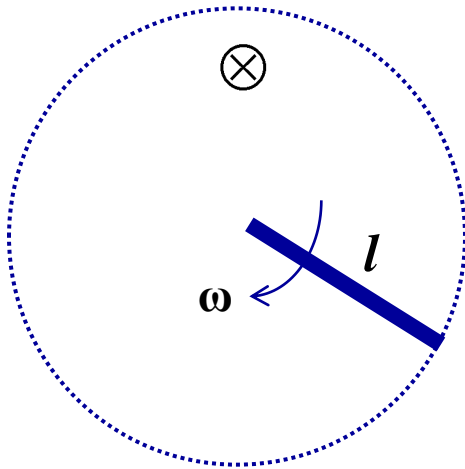
Barra de longitud l rotando perpendicular a un campo magnético uniforme.



Barra en campo uniforme con velocidad variable

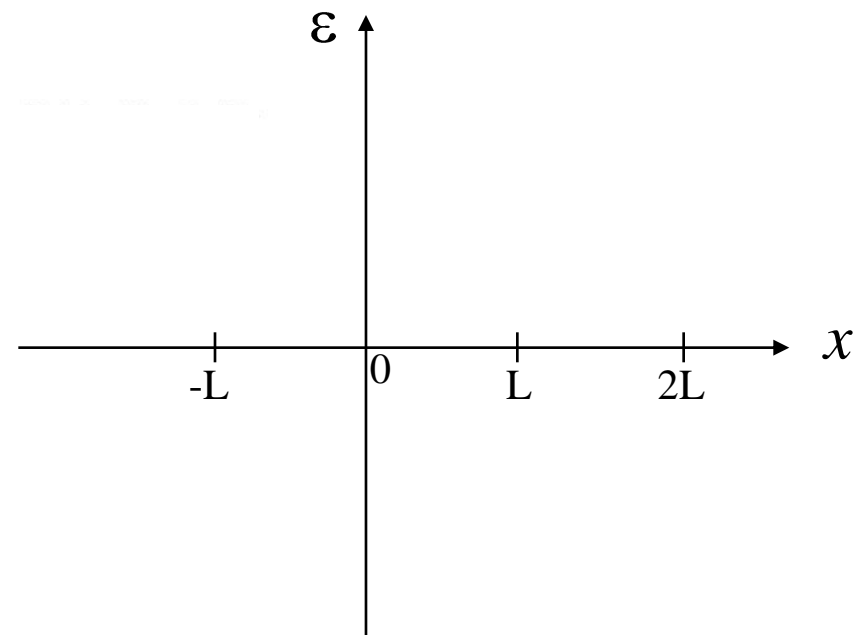
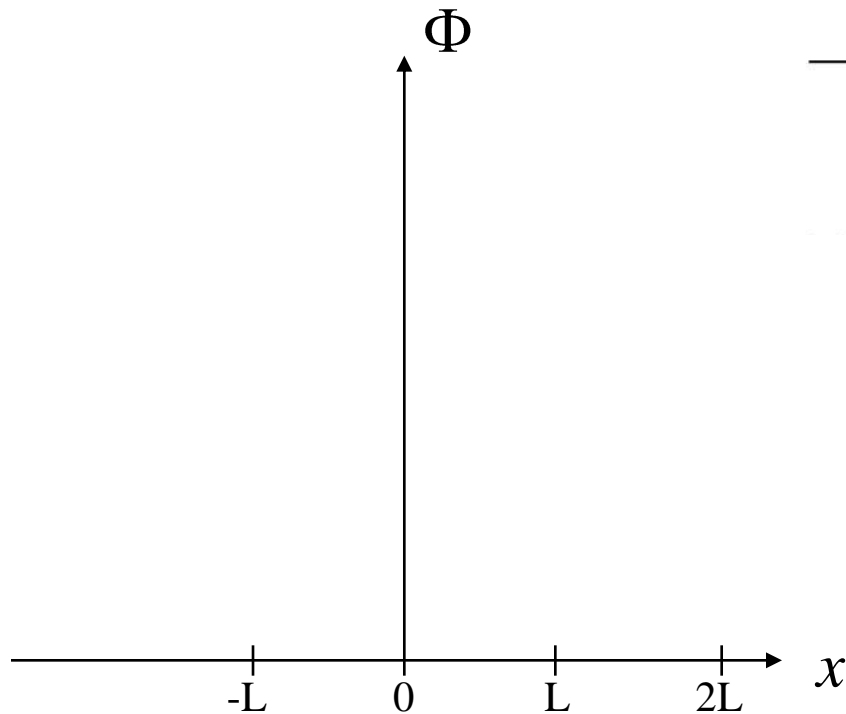
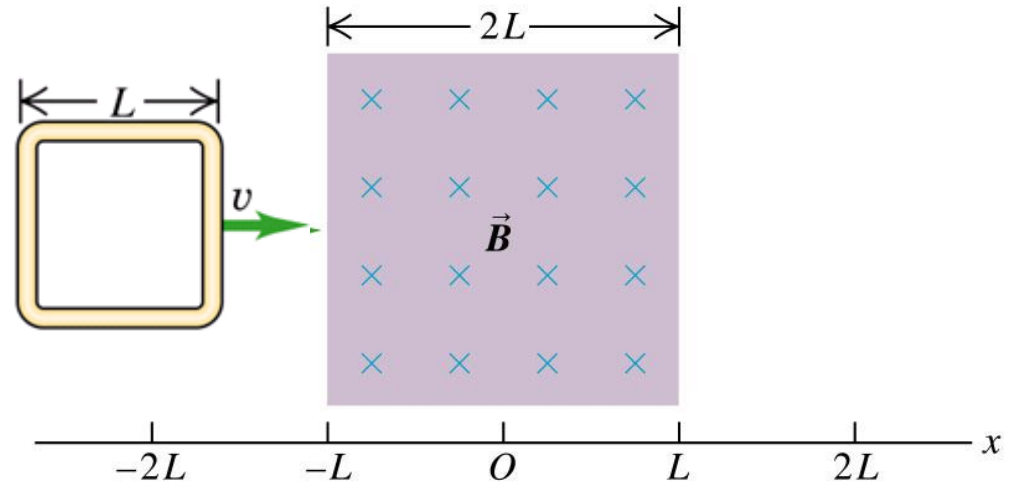
Tomemos un pedazo de barra y calculemos el diferencial de fem

$$\varepsilon = Blv \Rightarrow d\varepsilon = Bdlv$$



LAZO MOVIENDOSE A TRAVES DE UN CAMPO MAGNETICO UNIFORME

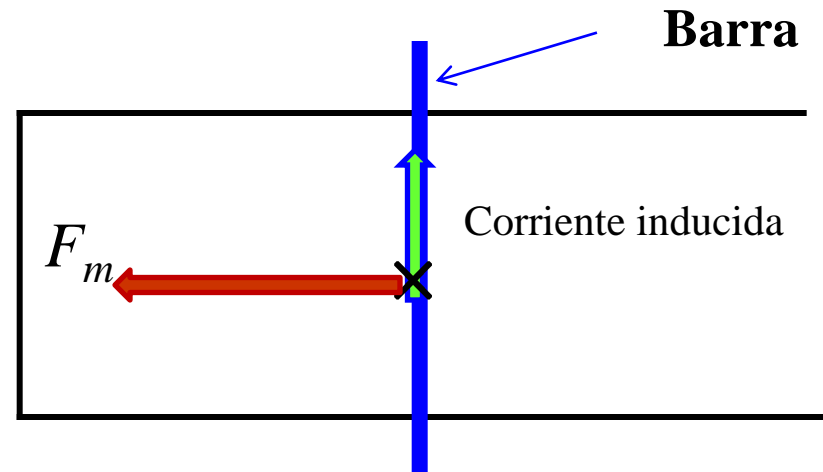
Grafique en los planos indicados en la figura, el flujo magnético y la fem inducida en la espira a medida que entra y sale del campo B



Pregunta de concepto

Un campo magnético uniforme apunta hacia dentro del papel y varía en el tiempo a razón $dB/dt = \text{constante positiva}$. Si sobre el riel conductor en forma de U se coloca una barra conductora, despreciando el rozamiento, la barra.

- a) no se moverá
- b) se moverá hacia la izquierda
- c) se moverá hacia la derecha
- d) rota en sentido horario
- e) rota en sentido antihorario



Un Generador Simple de C.A

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

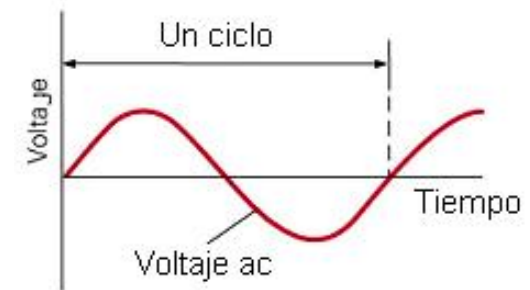
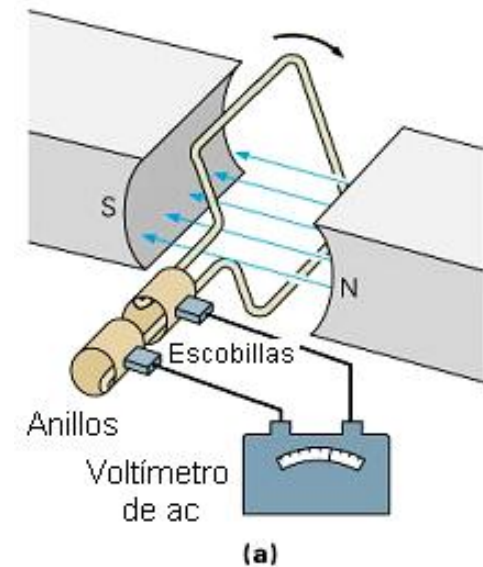
$$\Phi = BA \cos \theta$$

$$\Phi = BA \cos \omega t$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos \omega t)$$

$$\varepsilon = BA\omega \sin \omega t$$

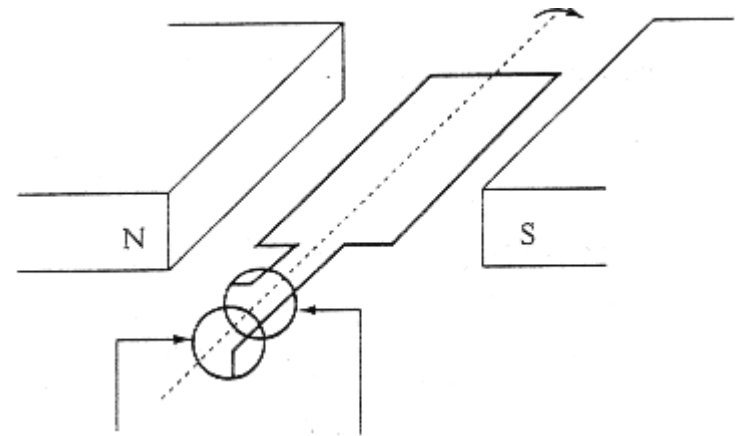
[Ver animación](#)



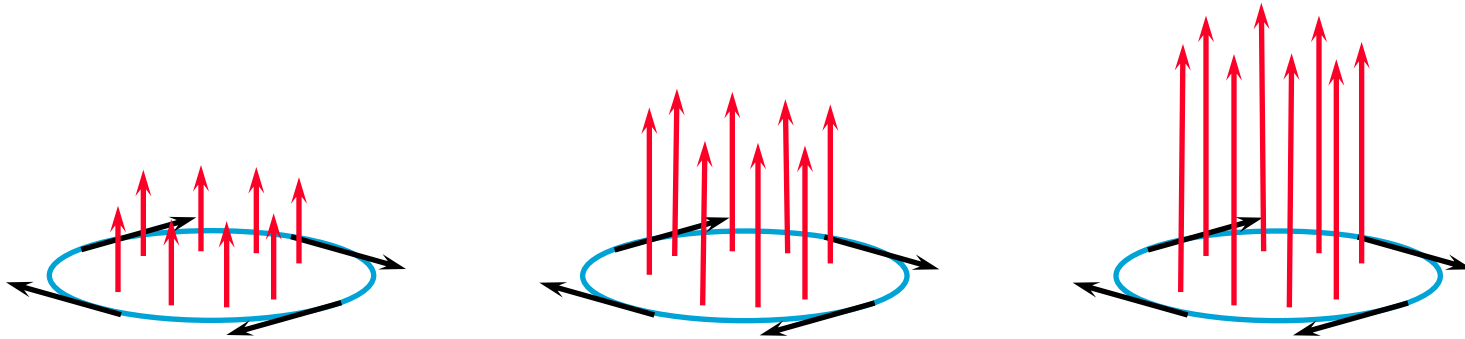
Pregunta de concepto

En el momento en que la bobina rotatoria está orientada como se indica, la salida de tensión en las escobillas

- A. es cero
- B. tiene su máximo valor
- C. tiene el mismo valor constante que en todas las otras orientaciones
- D. invierte el sentido



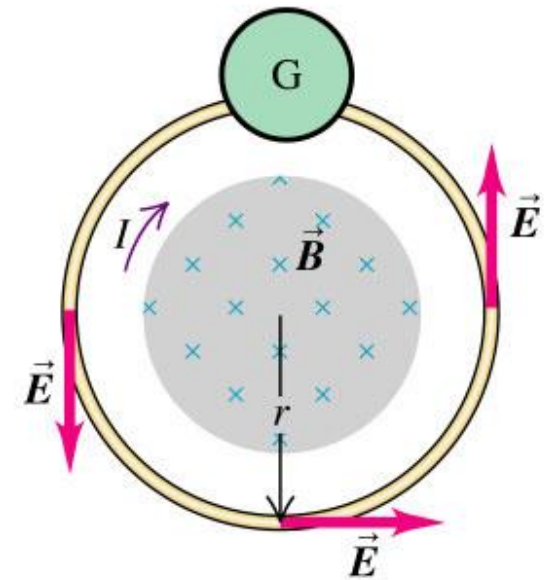
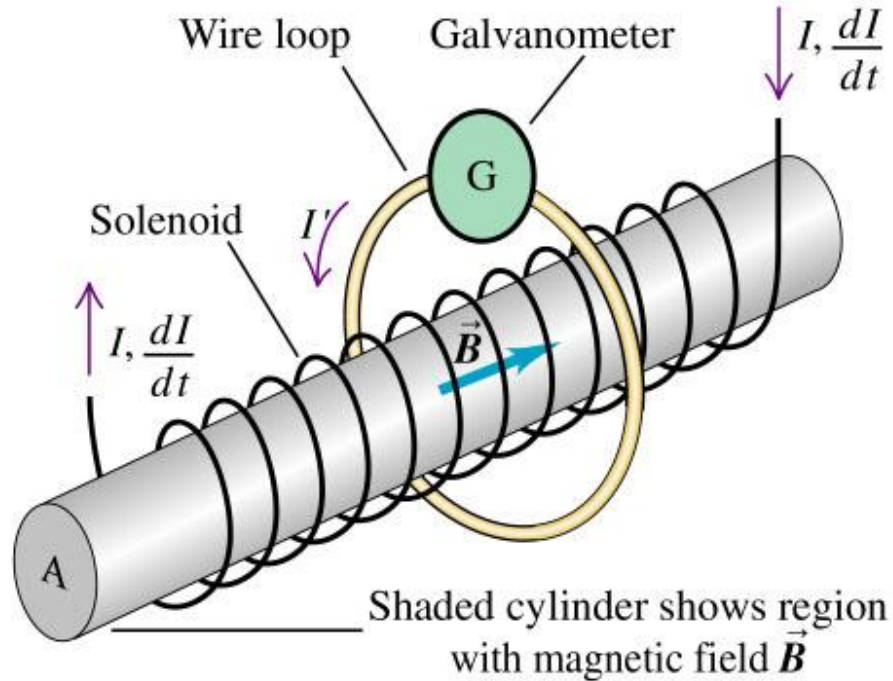
Campo Electrico Inducido



- Un campo magnético, incrementando en el tiempo, pasa a través del lazo
- Un campo eléctrico es generado por el campo magnético variable
- La circulación del campo \vec{E} genera corriente, igual que una diferencia de potencial

$$\varepsilon = \oint_{\text{trayectoria cerrada}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Campo eléctrico inducido: su presencia es independiente de si hay o no un conductor!!!



(b)

A veces es conveniente “imaginar” la presencia de una espira para determinar el campo eléctrico inducido.

$$\varepsilon = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

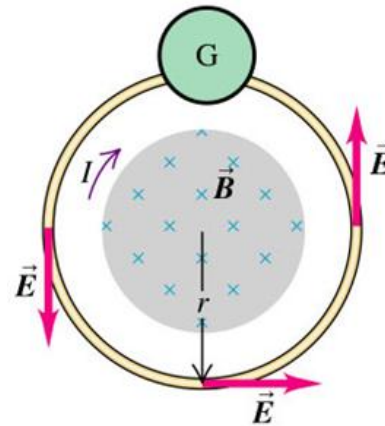
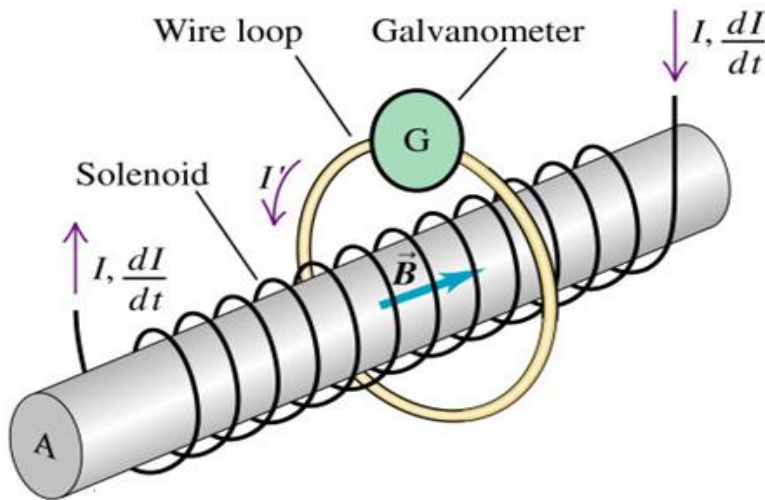
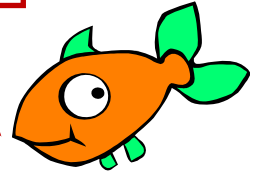
La integral cerrada de \vec{E} es la “fem”:

$$\varepsilon \equiv \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

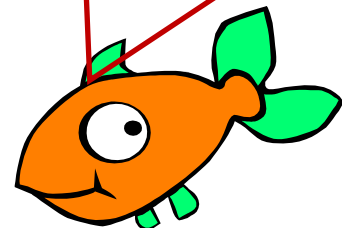
Nota:

- El lazo no tiene que ser un alambre.
- ¡La fem existe aún en el vacío!
- Cuando ponemos un alambre en ese lugar, los electrones responden a la fem, produciendo una corriente.

¿Qué es esto del campo inducido ?

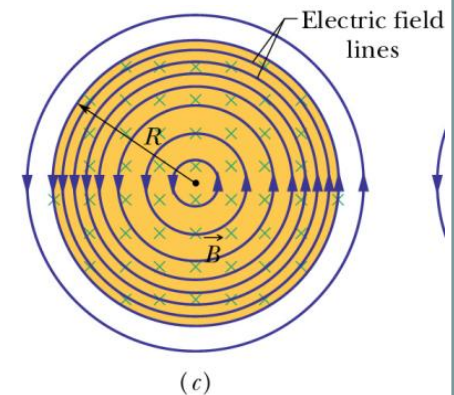
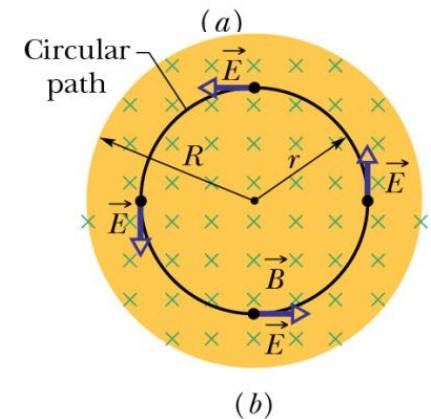
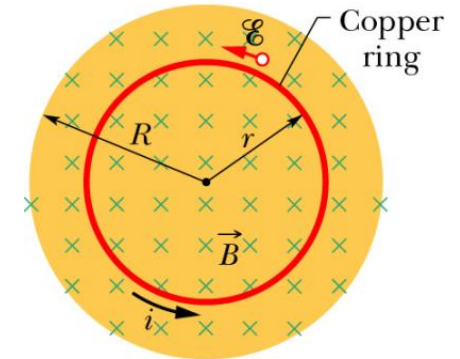


¡ \vec{E} inducido es independiente de la presencia o no de un conductor!



Campo Eléctrico inducido

- La existencia de un campo eléctrico es independiente de la presencia o no de una carga de prueba. **Aún en la ausencia del anillo de cobre, un campo magnético cambiante generará un campo eléctrico en el espacio vacío.**
- Trayectoria circular hipotética: el campo eléctrico inducido en varios puntos alrededor de la trayectoria circular debe ser tangente al círculo.
- Las líneas de campo eléctrico producidas por el campo magnético cambiante deben ser un set de circunferencias concéntricas.
- **Un campo magnético cambiante produce un campo eléctrico.**



Ejemplo: encuentre el campo eléctrico inducido

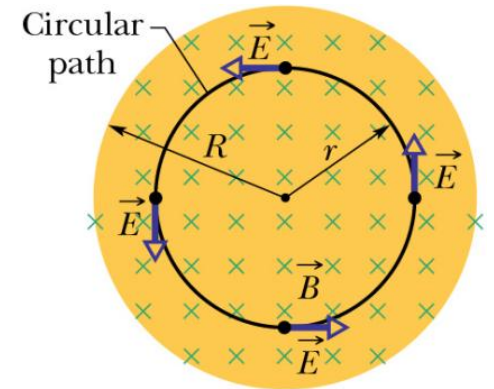
La figura de la derecha muestra la sección transversal de un solenoide ideal, el campo en su interior varía a razón $dB/dt = \text{constante}$, encuentre la expresión para la magnitud E del campo eléctrico inducido en puntos dentro y fuera del campo magnético.

Por simetría,

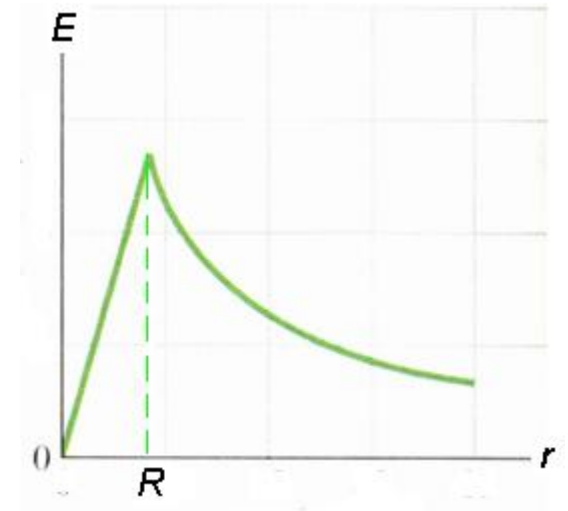
$r < R$:

$r > R$:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



(b)



Fem inducidas y Campos Eléctricos Inducidos: Resumen

- El campo eléctrico inducido está presente independiente de la presencia o no de un conductor.
- Si el conductor forma una espira cerrada, entonces la presencia de la *fem* generará una corriente, llamada corriente inducida.
- La presencia de un conductor asegura la existencia de una *fem* inducida en él, pero no necesariamente de una corriente.