



UC3M

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

Principios Físicos de la Informática

Tema 5: Inducción electromagnética

Ángel de Andrea González

Departamento de Física, Universidad Carlos III

aandrea@fis.uc3m.es



Introducción

- ❖ El descubrimiento, debido a **Oersted** en 1820, de que una **corriente eléctrica produce un campo magnético** estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo.
- ❖ Como la física es una ciencia en la que el pensamiento “simétrico” resulta frecuentemente muy productivo, en ese ambiente científico pronto **surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos**.
- ❖ Diez años después del experimento de Oersted, el norteamericano **John Henry** (1797-1878) y el inglés **Michael Faraday** (1791-1867) **encontraron**, independientemente, **que ello era posible**. En realidad Henry lo descubrió antes, pero Faraday publicó antes sus resultados (1831) y estudio el tema con mayor detalle (la publicación de Henry es de 1832).

La inducción electromagnética es la producción de corrientes eléctricas por flujos magnéticos variables con el tiempo. Por todo lo dicho se concluye que el descubrimiento por Faraday y Henry de la inducción electromagnética produce una cierta simetría en el mundo del electromagnetismo.

La experiencia con imanes de Faraday (1831)

Esta experiencia se realizó el 17 de octubre de 1831. Faraday utilizó un imán recto y una bobina conectada a un galvanómetro. Al introducir bruscamente el imán en la bobina observó una desviación en la aguja, desviación que desaparecía si el imán permanecía inmóvil en el interior de la bobina. Cuando el imán era retirado la aguja del galvanómetro se desplazaba de nuevo, pero esta vez en sentido contrario

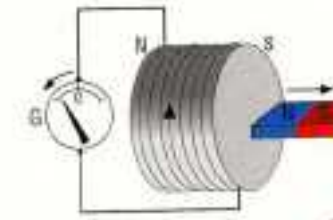
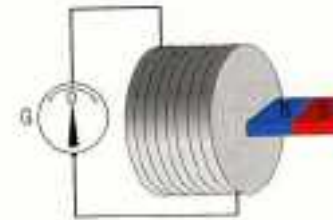
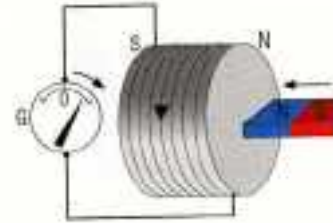
*La desviación de la aguja del galvanómetro sólo podía ser explicada mediante la existencia de una corriente, denominada **corriente inducida**, que es producida por una fuerza electromotriz, que se conoce como **fem inducida**.*

¿Fue Faraday el primer científico en hacer esta experiencia?

!!!No!!!



Colladon, Ginebra (1825)



Experiencias con imanes.



M. Faraday



J. D. Colladon

Experiencia de Henry (1831)

- ❖ **Joseph Henry** observó que si un conductor se mueve perpendicularmente en un campo magnético aparece una diferencia de potencial en sus extremos.
- ❖ Cuando se invertía el sentido del movimiento, cambiaba la polaridad de los extremos.
- ❖ Al cesar el movimiento desaparecía dicha diferencia de potencial

¿Posible explicación?

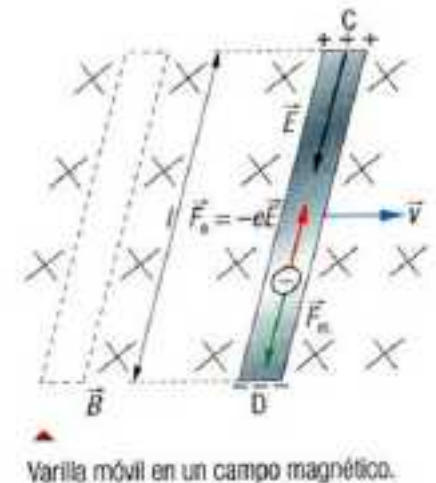
Para un observador que se mueva con la varilla, los electrones se ponen en movimiento mediante la acción de un campo eléctrico cuya intensidad será

$$\vec{E}_{ind} = \frac{\vec{F}_m}{-e} \Rightarrow \vec{E}_{ind} = \frac{-e\vec{v} \times \vec{B}}{-e} \Rightarrow \vec{E}_{ind} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Esto significa que se inducirá en la varilla una fuerza electromotriz (trabajo por unidad de carga) dada por

$$\varepsilon = \int_C \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{r} \Rightarrow \varepsilon = \int_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r}$$

A esta fuerza electromotriz (fem) se la denomina **fem de movimiento**



Leyes de la inducción electromagnética

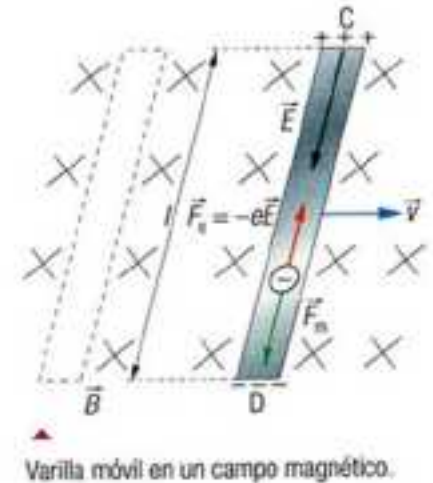
- ❖ Si la resistencia del circuito es despreciable el valor de esta **fem inducida** es igual a la **diferencia de potencial**.
- ❖ Como el campo y la velocidad son constantes, el campo eléctrico inducido resultará ser también constante. Puesto que el vector intensidad de campo eléctrico y el desplazamiento elemental apuntan hacia las cargas positivas, integrando, la fem resulta;

$$\varepsilon = V_C - V_D = E_{ind} \cdot L \Rightarrow \varepsilon = vBL$$

Donde el extremo C está a mayor potencial que el D



Joseph Henry
(1797-1878)



Ley Faraday y ley de Lenz

El fenómeno de la inducción electromagnética se rige por dos leyes: una de tipo de tipo cuantitativo que determina la magnitud de la fem inducida, la Ley de Faraday y otra de tipo cualitativo, que explica físicamente el origen del sentido de la corriente inducida, la ley de Lenz:

- **La Ley de Faraday** establece que *la fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético en su interior. Esta ley pone de manifiesto que la variación del flujo magnético induce una fuerza electromotriz, siendo ésta independiente del modo en que se produce la variación del flujo magnético.*
- **Ley de Lenz:** *el sentido de las corrientes inducidas es tal que sus efectos magnéticos tienden a oponerse a la causa que las produce.*

Ambas se resumen cuantitativamente en la ley de Neumann

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

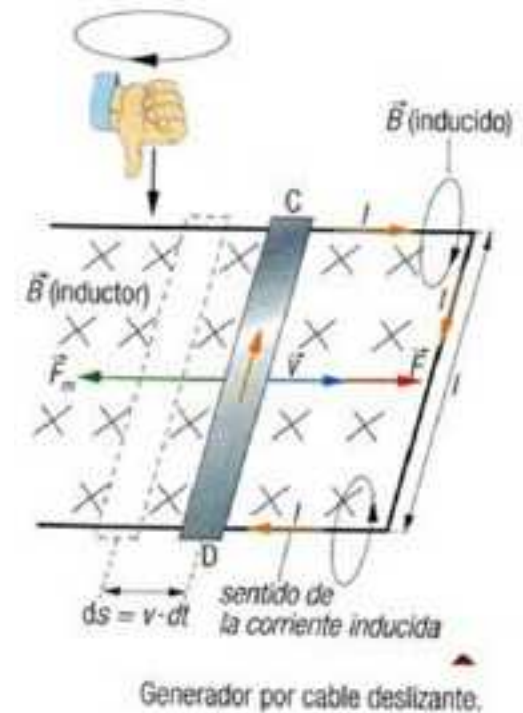
«La fem inducida es igual, pero de signo opuesto, a la rapidez con la que varía el flujo magnético»

A la ley de Neumann también se le conoce con el nombre de ley de Faraday-Henry, ley de Faraday-Lenz o si no cabe confusión, ley de Faraday.

Generador de corriente continua

- El signo negativo aparece en la ley de Neumann para indicar el sentido de la corriente inducida: una fem positiva produce una corriente que genera un flujo en el sentido al del campo inicial existente y una fem negativa produce una corriente que genera un flujo en el sentido opuesto al del campo existente.
- Por ejemplo, en la figura anterior, como : $d\phi < 0 \Rightarrow \varepsilon > 0$

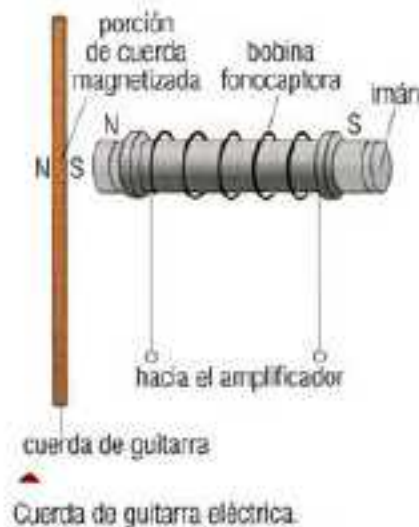
*la corriente tiene sentido horario porque, por la **regla de la mano derecha**, aquella produce un flujo en el sentido del campo existente . Siempre es conveniente tomar el vector superficie en la misma dirección y sentido que la componente normal del campo en dicha superficie.*



Para qué sirve esto...

Una vez el Primer Ministro británico preguntó a Faraday si sus investigaciones tenían valor práctico. Faraday contestó proféticamente que algún día los gobiernos cobrarían a los ciudadanos impuestos por el uso de estas invenciones; y es que toda la producción industrial de energía eléctrica o, más concretamente los alternadores están basados en la ley de Faraday.

Aplicaciones de la ley de Faraday



Para qué sirve esto...

Los cables de algunos teléfonos fijo o de teclados de ordenador aparecen enrollados en forma de hélice. Esto se hace así, para que de igual forma que un solenoide, el campo magnético que crea el cable quede prácticamente confinado en el interior del arrollamiento. Así se evita que los campos magnéticos creados afecten al auricular del teléfono o bien distorsionen la imagen del monitor. Por otro lado si se mueve el cable, también se evita que un flujo magnético variable induzca una fuerza electromotriz en la línea telefónica o en el monitor del ordenador.

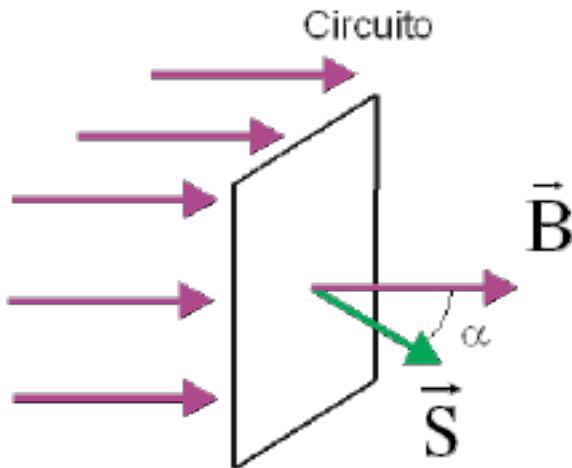
La Ley de Faraday explica el funcionamiento de una guitarra eléctrica.

Una cuerda que vibra a una determinada frecuencia, previamente magnetizada por una bobina fono captadora, induce una fuerza electromotriz en ésta última, alimentando la corriente inducida un amplificador produciéndose el sonido. La reproducción de un casete de música o de video se produce al pasar la cinta ferromagnética, que esta magnetizada con un campo magnético variable, por el cabezal de reproducción induciendo una corriente en dicho cabezal.

Causas de variación del flujo magnético

Considérese por simplicidad, un circuito plano (espira). El circuito limita una superficie plana de vector superficie (ver figura) . El flujo magnético a través de la superficie del circuito debido a un campo magnético uniforme de inducción viene dado por

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



Luego la variación del flujo magnético a través de un circuito puede deberse a tres causas diferenciadas o bien a una mezcla de todas:

- Variación del módulo de la inducción magnética (experiencias con imanes de Faraday).
- Variación del módulo de la superficie del circuito (deformación de un circuito).
- Variación de la orientación entre ambos (del ángulo que forman el vector inducción magnética y el vector superficie). Éste es el fundamento de las corrientes inducidas en los alternadores y las dinamos.

Generalización de la ley de Faraday-Lenz

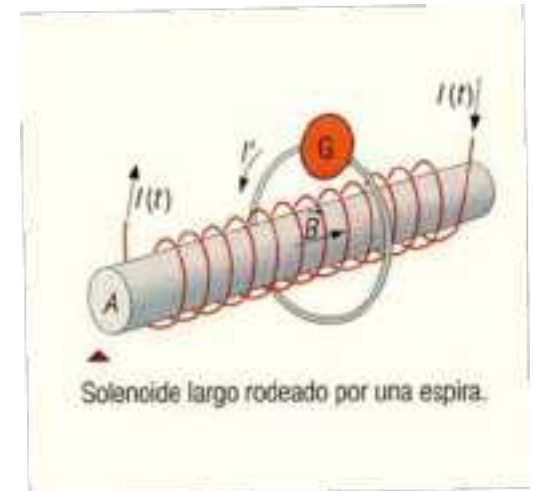
- Considérese un **solenoides largo** recorrido por una corriente variable rodeado por una **espira** circular en reposo.
- El **galvanómetro** en la **espira** acusa la existencia de una **corriente inducida**.
- Puesto que la **espira** se halla inmóvil, sobre los electrones no actúa ninguna **fuerza magnética**.
- Por lo tanto, para ponerlos en movimiento, ha de existir un **campo eléctrico inducido** en el conductor ocasionado por el **flujo magnético variable**.
- El **trabajo** realizado por el **campo eléctrico inducido** por unidad de carga positiva, a lo largo del circuito (espira) de longitud L , es la **fem inducida**

$$\epsilon = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Esta expresión resalta el carácter no conservativo del campo eléctrico inducido. Teniendo en cuenta la ley de Faraday y la expresión general del flujo a través de una superficie S (la del circuito), resulta:

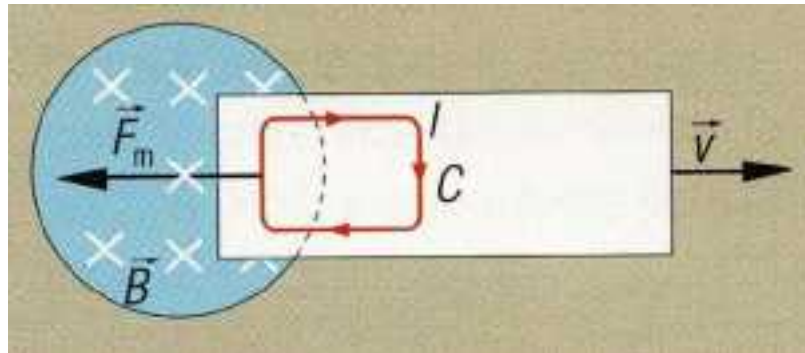
$$\epsilon = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Un campo magnético variable con el tiempo induce un campo eléctrico no conservativo



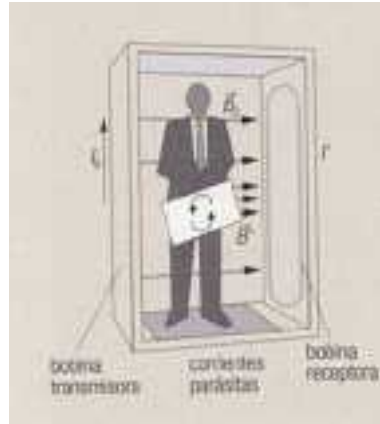
Corrientes de Foucault

- Las **corrientes de Foucault** son corrientes parásitas inducidas en todo el volumen de un conductor sometido a un campo magnético variable con el tiempo.
- Su existencia se puede demostrar empujando una lámina metálica entre los polos de un imán: el flujo magnético disminuye y por las **Leyes de Faraday y Lenz** existirá una **corriente parásita** inducida en el sentido de las agujas del reloj.
- El campo magnético ejercerá una **Fuerza magnética** sobre la corriente que se opone al movimiento de la lámina, frenándola.
- Estas **corrientes** pueden ser muy **intensas** porque la **resistencia óhmica** del metal es muy pequeña o **casi nula**.



Aplicaciones de las corrientes de Foucault

- Algunas de las aplicaciones de las **corrientes de Foucault** son: los hornos de inducción, los detectores de metales, los frenos electromagnéticos o las máquinas expendedoras.



- Los **hornos de inducción**. Estas corrientes producen una disipación de energía en forma de calor (efecto Joule) y que se aprovecha en los hornos de inducción para calentar o fundir materiales en contenedores sellados.
 - Los **detectores de metales** producen campos magnéticos variables con el tiempo sobre objetos metálicos induciendo y detectando las corrientes parásitas.
 - Las **máquinas expendedoras** inducen corrientes de Foucault en las monedas. A través de un sensor, si la fuerza magnética que las frena es la adecuada, la moneda será aceptada.
-

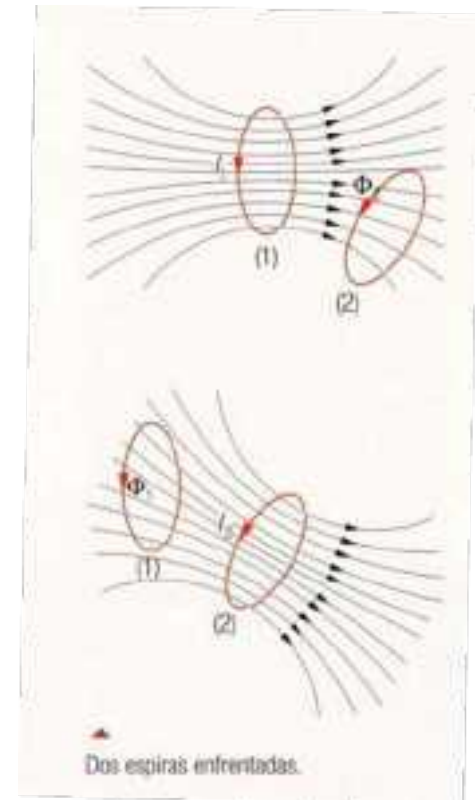
Inducción mutua

Considérese el circuito 1 y el 2 de la figura cuando una corriente de intensidad I_1 circula por el circuito 1, esta produce un campo magnético proporcional a I_1 y a través del circuito 2 hay un flujo magnético ϕ_2 que es directamente proporcional a I_1 . Luego:

$$\phi_2 = M_{21}I_1$$

donde M_{21} es un coeficiente de proporcionalidad y representa el flujo magnético a través del circuito 2 por unidad de corriente en el circuito 1. De igual forma si una corriente I_2 circula por el circuito 2, se produce un campo magnético que a su vez produce un flujo magnético a través del circuito 1, el cual es directamente proporcional a I_2 . Luego, $\phi_1 = M_{12}I_2$

Siendo M_{12} el coeficiente de proporcionalidad, que representa el flujo magnético a través del circuito 1 por unidad de corriente en el circuito 2. Se puede demostrar, que si los circuitos están en un medio lineal los coeficientes de proporcionalidad son idénticos: $M = M_{21} = M_{12}$



Inducción mutua

Al coeficiente común M entre dos circuitos se le denomina coeficiente de inducción mutua o inductancia mutua. La igualdad de M en ambos circuitos es una prueba más de otra de las simetrías tan comunes de la Física. La inductancia mutua representa el flujo magnético que atraviesa un circuito debido a otro por unidad de corriente en el mismo.

$$M = \frac{\phi_1}{I_2} = \frac{\phi_2}{I_1}$$

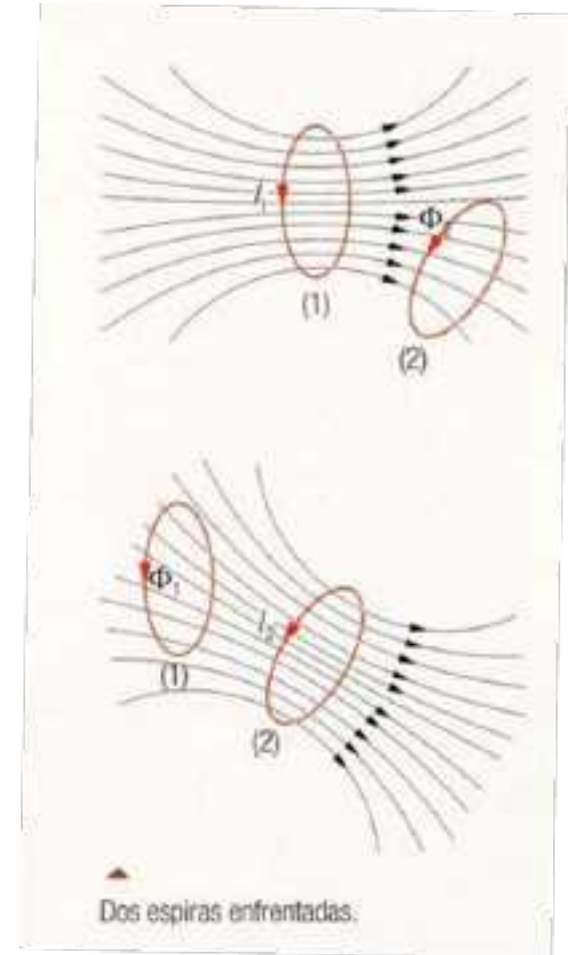
La inductancia mutua depende de las características geométricas de los dos circuitos, de su distancia y orientación entre ellos, así como de la presencia de materiales magnéticos en los alrededores de los mismos.

La unidad en el SI de la inductancia mutua es el henrio. La fem inducida en el circuito 2 por el circuito 1 teniendo en cuenta la expresión anterior y suponiendo ambos circuitos rígidos en un medio lineal ($M = \text{cte}$), será

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\phi_2}{dt} = -\frac{d(MI_1)}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}$$

y la fem inducida en el circuito 1 por el circuito 2

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\phi_1}{dt} = -\frac{d(MI_2)}{dt} = -M \frac{dI_2}{dt}$$



Aplicaciones del fenómeno de inducción mutua

- ✓ Ciertos **marcapasos** se activan exteriormente mediante **inducción mutua**. El flujo magnético de una bobina exterior atraviesa otra colocada en el marcapasos situado en el corazón. La ventaja frente a los marcapasos de pilas es que no es necesaria intervención quirúrgica para sustituir pilas al gastarse.



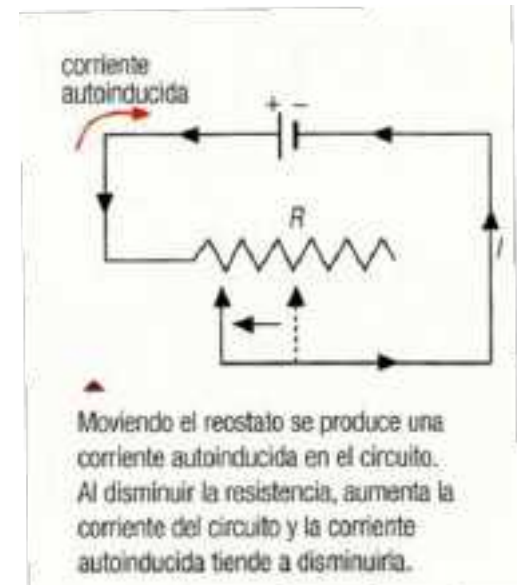
- ✓ En los **circuitos de electrónica** el **cableado** se halla retorcido entre sí para compensar, al variar la orientación, las inducciones mutuas de unos cables con otros, lo que podría originar parásitos o ruidos de fondo.



Autoinducción

- Cuando un circuito está recorrido por una corriente variable con el tiempo, ésta produce un flujo magnético variable a través del mismo; por ello, se induce una fem y una corriente.
- Esta **extracorrente** se denomina **corriente autoinducida** y al fenómeno, **autoinducción** descubierto por J. Henry, aunque no publicó el descubrimiento.
- Cuando el circuito está en un **medio lineal** (intensidad y permeabilidad magnética independientes entre sí) e isótropo, el flujo magnético que atraviesa aquel debido a su propio campo es directamente proporcional a la intensidad de corriente, donde la constante de proporcionalidad recibe el nombre de **coeficiente de autoinducción** o simplemente **inductancia**.

$$\phi = LI$$



Autoinducción

Si el circuito se encuentra en un medio lineal e isótropo y, además, es rígido ($L = \text{cte}$), es decir indeformable, estando recorrido por un flujo magnético variable, la fem instantánea autoinducida será

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} \Rightarrow \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}.$$

- La **inductancia** depende de las características geométricas del **circuito** y de los materiales magnéticos presentes en sus proximidades: es muy pequeña si el hilo conductor del circuito es rectilíneo, pero **aumenta mucho al arrollarlo en espiral**.
- La inductancia no está concentrada en un punto particular del circuito, sino que es una propiedad de dicho circuito como un todo. Una inductancia se representa por:



Autoinducción

- ✓ Como los materiales magnéticos pueden alterar la inductancia de una bobina, para controlar los semáforos en las **intersecciones de tráfico** se entierran en el pavimento **bobinas planas**. Al pasar un coche sobre ellas, el hierro de su carrocería modifica la **inductancia** en la bobina, produciéndose el **cambio en el semáforo**.

