
FÍSICA

2º Bachillerato

Interacción Electromagnética III Inducción Electromagnética

Prof. Jorge Rojo Carrascosa

Índice general

1. INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA III.	
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	2
1.1. EXPERIENCIAS DE FARADAY y HENRY	2
1.1.1. PRIMER EXPERIENCIA DE FARADAY	3
1.1.2. SEGUNDA EXPERIENCIA DE FARADAY	4
1.1.3. EXPERIENCIA DE HENRY	4
1.1.4. CONCLUSIONES	5
1.2. FLUJO MAGNÉTICO	5
1.3. LEYES DE LA INDUCCIÓN	6
1.3.1. LEY DE FARADAY-HENRY	6
1.3.2. LEY DE LENZ	6
1.3.3. SINTESIS	7
1.4. PRODUCCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA y CONTINUA	7
1.4.1. EL ALTERNADOR	7
1.4.2. LA DINÁMO	8
1.5. LA ENERGÍA ELÉCTRICA	9
1.5.1. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN	9
1.6. ANEXOS	10
1.6.1. LAS ECUACIONES DE MAXWELL	10
1.6.2. SINTESIS ELECTROMAGNÉTICA	11
1.7. PROBLEMAS RESUELTOS	12

Capítulo 1

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA III. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Con el nombre de **inducción electromagnética** se hace referencia a la posibilidad de que un campo magnético puede inducir un campo eléctrico. Este fenómeno tiene una importancia capital para la sociedad, no en vano, gracias a la inducción, las centrales eléctricas son capaces de producir energía o podemos comunicarnos a distancia mediante telefonía móvil.

Demostrada, a comienzos del siglo XIX, la participación de la corriente eléctrica en la generación de campos magnéticos, dio lugar a que muchos científicos intentaran demostrar el efecto contrario, esto es, obtener corriente eléctrica a partir de un campo magnético. En 1831, **Michael Faraday** y **Joseph Henry**, demostraron independientemente, como un campo magnético variable era capaz de generar una corriente eléctrica.

1.1. EXPERIENCIAS DE FARADAY y HENRY

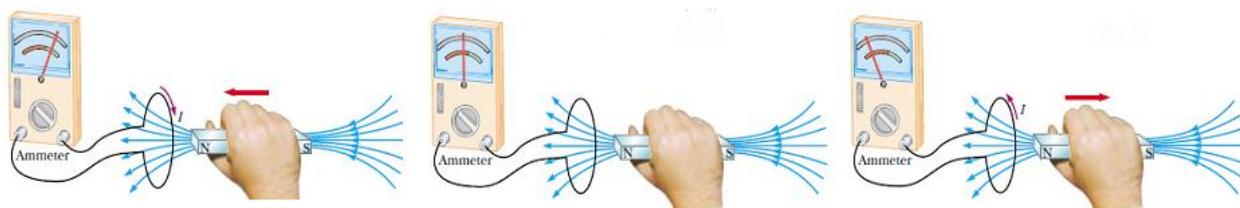
Faraday realizó cuantiosas experiencias con el fin de demostrar la producción de corriente eléctrica a través de campos magnéticos, de éstas, podemos destacar principalmente dos:

1.1.1. PRIMER EXPERIENCIA DE FARADAY

Sobre un circuito formado por una espira, el cual no posee generador eléctrico y si un galvanómetro para medir pequeñas corriente eléctricas, observó como el galvanómetro indicaba paso de corriente eléctrica al aproximar un imán a la espira.

En la experiencia se observaba claramente que:

- El galvanómetro no marcaba paso de corriente cuando se mantenian fijos el imán y el circuito.
- Cuanto más rápidamente se hacía el movimiento del imán sobre la espira, mayor era el paso de corriente observado.
- Al alejar el imán, la aguja del galvanómetro observa paso de corriente pero en sentido contrario.
- Si se mantenía el imán en reposo y se movía hacía él el circuito, también se observaba corriente.



Estos fenómenos dejaron una serie de conclusiones:

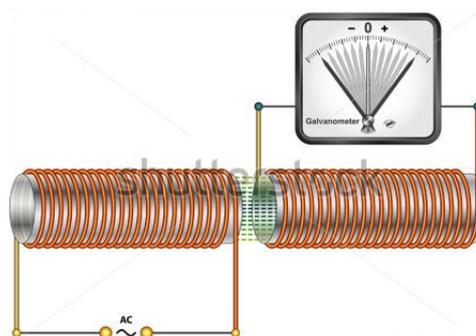
- La **corriente inducida** sólo aparecía cuando existía movimiento relativo entre el imán y el circuito.
- La corriente cambiaba de sentido cuando se invertía el sentido del movimiento.
- El paso de corriente cesaba cuando no existía movimiento.
- El circuito en el que aparece la corriente se denomina **inducido**.
- El imán (o elemento) productor de la corriente se llama **inductor**.

La corriente que aparece en la espira es consecuencia de una fuerza electromotriz (fem) denominada **fuerza electromotriz inducida**. Esta experiencia no sólo se realizó con una espira, también se hizo sobre una bobina dando los mismos resultados.

1.1.2. SEGUNDA EXPERIENCIA DE FARADAY

En la segunda experiencia a destacar, Faraday dispuso de una barra de hierro sobre la cual se enrollaban dos bobinas, la primera conectada a un generador y un interruptor, y la segunda conectada simplemente a una galvanómetro.

La experiencia mostraba que al cerrar el interruptor se inducía corriente (brevemente) sobre la segunda bobina pero en sentido contrario, sin embargo, al abrir el circuito, se volvía a inducir corriente pero al contrario de como lo hacia anteriormente.

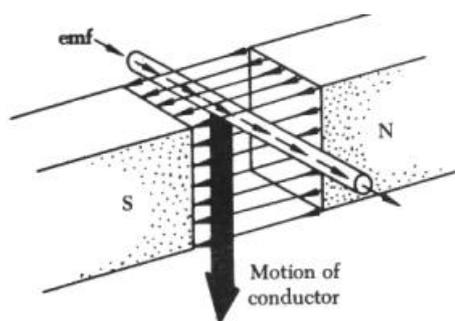


Es decir, existía corriente en la segunda bobina cuando aumentaba o disminuía la intensidad de corriente en la primera, pero no al mantenerse constante.

1.1.3. EXPERIENCIA DE HENRY

Joseph Henry descubrió que si un conductor de cierta longitud se movía perpendicularmente a un campo magnético, se creaba una diferencia de potencial en los extremos de un conductor.

Si el conductor formaba parte de un circuito cerrado, esa diferencia de potencial originaba una corriente.



La observación del fenómeno dejaba tres puntos claves:

- La corriente sólo se inducía si el conductor se movía cortando las líneas del campo magnético. Es decir, si se dejaba quieto o se movía paralelo al campo, no había corriente.
- El galvanómetro indicaba paso de corriente al mover el conductor perpendicularmente a las líneas de campo.
- La corriente cambiaba de sentido según se movía en un sentido u otro el conductor.

1.1.4. CONCLUSIONES

Como podemos deducir de las experiencias estudiadas, en todos los casos se produce una variación del número de líneas de campo magnético que atraviesan el circuito, ya sea por movimiento relativo o por variación de la corriente eléctrica con el tiempo. Así pues,

La inducción electromagnética permite la aparición de corriente eléctrica sobre un circuito cuando varía el número de líneas de campo magnético que lo atraviesan en función del tiempo.

1.2. FLUJO MAGNÉTICO

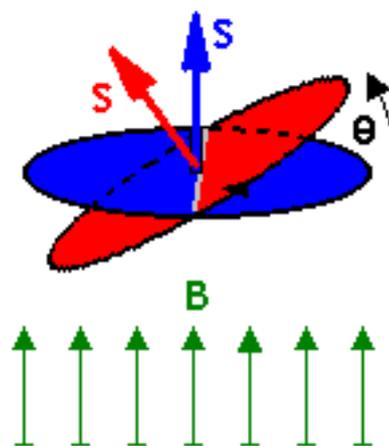
Es una magnitud que representa el número de líneas de campo magnético que atraviesa una superficie, más concretamente un circuito. Matemáticamente se expresa como Φ y sus unidades en el SI son weber (**W**). El weber es el flujo magnético que atraviesa una superficie de 1 m^2 situada perpendicularmente a una campo magnético de 1 T .

Si consideramos una superficie plana S , colocada perpendicularmente a la dirección de las líneas de inducción de un campo magnético uniforme, el flujo magnético que atraviesa la superficie vendrá dado por el producto,

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Si la superficie y el campo forman un ángulo θ , habrá que calcular la proyección del campo magnético sobre la superficie para encontrar el valor del flujo magnético.

$$\Phi = BS \cos \theta$$



De forma general, si el campo no es uniforme o la superficie no es plana, habrá que descomponer la superficie en pequeños elementos infinitesimales donde podamos considerar que el campo es uniforme y hallar el flujo resolviendo la integral,

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Como vemos, el flujo magnético depende de tres factores: campo magnético, superficie y del ángulo que forman las líneas del campo con el vector normal a la superficie. **Basta con que cambie uno de ellos para que exista variación de flujo.**

1.3. LEYES DE LA INDUCCIÓN

Los principios en los que se asienta la inducción electromagnética son:

1. La variación de flujo que atraviesa un circuito cerrado da lugar a la aparición de una corriente inducida.
2. La corriente inducida es instantánea, es decir, esta presente mientras dura la variación del flujo magnético.

1.3.1. LEY DE FARADAY-HENRY

Tiene como enunciado el siguiente:

La fuerza electromotriz inducida, ε , en el circuito es igual a la variación del flujo magnético que lo atraviesa en la unidad de tiempo.

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

La Ley de Faraday-Henry nos da el valor de la fem inducida pero no nos dice nada sobre el sentido de la corriente.

1.3.2. LEY DE LENZ

Como hemos visto en las observaciones de las distintas experiencias de la sección 1.1, la corriente variaba de sentido en función del movimiento. Este aspecto fue estudiado y demostrado por **Heinrich Lenz**.

La Ley de Lenz dice: *El sentido de la corriente inducida se opone a la variación de flujo que la produce.*

En otras palabras, esta ley representa la tercera ley de Newton o ley de acción y reacción en el electromagnetismo, donde el sentido de la corriente tiende a oponerse a la causa que lo produce. Es decir, el flujo magnético producido por la corriente inducida se va a oponer a la variación del flujo magnético inductor.

- Si se incrementa el valor absoluto del flujo, la corriente inducida circula de tal manera que el campo magnético inducido creará un flujo de signo contrario que se opondrá a ese incremento.

- Si disminuye el valor absoluto del flujo, la corriente inducida circula de tal manera que el campo magnético inducido creará un flujo de igual signo para compensar la disminución.

1.3.3. SINTESIS

Si tenemos en cuenta ambas leyes, podemos sintetizarlas en una sola expresión matemática que reúne las dos expresiones:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

En el caso de una bobina formada por N espiras, la fem inducida será:

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

1.4. PRODUCCIÓN DE CORRIENTE ALTERNATIVA y CONTINUA

No hay dudas si decimos que la electricidad es un pilar fundamental en nuestra sociedad, la mayor calidad de vida y el desarrollo industrial de cualquier país está condicionado por la energía eléctrica. Pues bien, la inducción electromagnética tiene como principal aplicación la obtención de energía eléctrica a partir de la energía mecánica.

Los **generadores eléctricos** son los dispositivos encargados de transformar la energía del movimiento en energía eléctrica, existiendo dos tipos: el **alternador** que genera corriente alterna y la **dinámico** que produce corriente continua.

1.4.1. EL ALTERNADOR

La forma más sencilla de un alternador consiste en una espira plana que gira con una velocidad angular constante dentro de un campo magnético creado por imanes.

El flujo que atraviesa la espira variará como:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

siendo α el ángulo que forma el vector campo magnético con el vector superficie de la espira en cada instante. Puesto que la espira gira con velocidad angular constante,

el ángulo descrito por la espira podemos reescribirlo utilizando la expresión del movimiento circular uniforme y sustituirlo en la expresión del flujo,

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

A partir de las leyes de la inducción y teniendo en cuenta que el alternador contiene N espiras, obtenemos la definición de la fem inducida,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = NBS\omega \sin \omega t$$

Siendo su valor máximo cuando la función seno valga la unidad, quedando,

$$\varepsilon_{max} = NBS\omega = \varepsilon_0$$

De ahí que en muchas ocasiones, la expresión de la fem inducida venga dada por,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

Recordad las relaciones cinemáticas, $\omega = 2\pi\nu$, donde ν es la frecuencia del cambio de sentido de la corriente. La frecuencia de la corriente eléctrica que llega a nuestra casa es de 50 Hz, es decir, en un segundo realiza 100 cambios de sentido (el sentido de la corriente varía dos veces en cada ciclo).

Teniendo en cuenta la relación entre intensidad, voltaje y resistencia (Ley de Ohm), podemos hallar la intensidad de corriente que circula por un generador,

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_0 \sin \omega t}{R} = I_0 \sin \omega t$$

1.4.2. LA DINÁMO

Al igual que el alternador, consiste en una bobina que gira entre dos polos de un imán. Sin embargo, los extremos de la bobina están conectados a dos semianillos apoyados en dos escobillas. En cada vuelta de la espira, los semianillos cambian de escobilla y por eso, la corriente en el circuito externo circula en el mismo sentido y tenemos corriente continua.

En la corriente continua los electrones tienen un movimiento continuo y en el mismo sentido a través del conductor.

1.5. LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica es *relativamente* limpia ya que no produce residuos o contaminación, además puede transformarse fácilmente en energía mecánica o térmica y puede ser transportada, con seguridad y eficacia, hasta largas distancias.

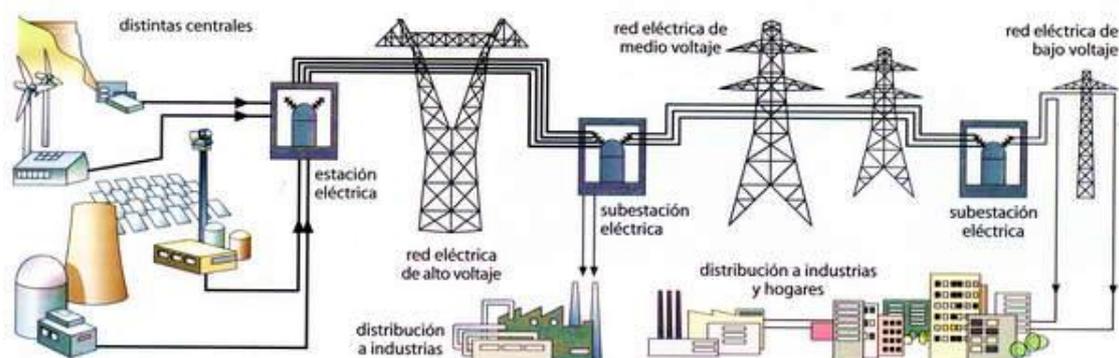
Se produce a gran escala en las centrales eléctricas y su impacto sobre el medio ambiente viene determinada por las materias primas utilizadas, agua, gas, uranio,...

El elemento básico de cualquier central eléctrica, exceptuando la solar fotovoltaica, es un **alternador** en cuyo eje se le acopla una **turbina** para hacerle girar. El movimiento de la turbina como consecuencia de la materia prima que incide sobre ella provoca el movimiento del eje del alternador y por tanto, la producción de la corriente alterna por inducción electromagnética.

Así, en función de la materia prima utilizada podemos tener centrales hidroeléctricas (caída del agua), térmicas (vapor de una combustión), nucleares (vapor por fisión nuclear), eólicas (viento), solares fotovoltaicas (sol) o geotérmicas (vapor de una caldera).

1.5.1. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN

El transporte desde las centrales eléctricas se realiza con muy altos voltajes (10 kV) y en una primera estación transformadora se eleva hasta cientos de miles de voltios. Su transporte se realiza mediante líneas de alta tensión hasta reducirse, en nuevas estaciones transformadoras próximas a los lugares de consumo, a la tensión de los 220 V que consumimos en nuestras viviendas.



1.6. ANEXOS

1.6.1. LAS ECUACIONES DE MAXWELL

James Clerk Maxwell unificó todas las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo en cuatro ecuaciones conocidas como las **ecuaciones de Maxwell** o **ecuaciones del campo electromagnético**.

- **PRIMERA ECUACIÓN DE MAXWELL:** Es el teorema de Gauss para el campo eléctrico: *El flujo del campo eléctrico que atraviesa una superficie cerrada es proporcional a la carga neta encerrada en la superficie.* Permite describir como las líneas de campo eléctrico parte de las cargas positivas y acaban en las negativas.

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{neta}}{\epsilon_0}$$

- **SEGUNDA ECUACIÓN DE MAXWELL:** Es la Ley de Gauss para el campo magnético: *El flujo del vector inducción magnética que atraviesa una superficie cerrada es cero.* La evidencia experimental de esta Ley es que no existen monopolos magnéticos.

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- **TERCERA ECUACIÓN DE MAXWELL:** Se trata de la Ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética: *Un campo magnético variable genera un campo eléctrico a su alrededor.*

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- **CUARTA ECUACIÓN DE MAXWELL:** Expresa el teorema de Ampère junto con la ampliación de Maxwell, de ahí que se le conozca como teorema de Ampère-Maxwell: *Un campo magnético puede ser generado por una corriente eléctrica o por un campo eléctrico variable.*

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

1.6.2. SINTESIS ELECTROMAGNÉTICA

El paralelismo entre los campos eléctricos y magnéticos y su simultaneidad en el espacio, da lugar a una perturbación que se propaga en el espacio de forma ondulatoria y que se denomina, **onda electromagnética**.

Maxwell demostró que la propagación de la onda electromagnética poseía las propiedades de cualquier onda (reflexión, refracción, interferencias, . . .) pero que además, éstas, no necesitaban de un medio material para propagarse. Sus estudios incluyeron el cálculo de la velocidad de estas ondas, llegando al siguiente valor:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

siendo ε_0 la constante dieléctrica del vacío y μ_0 la permitividad magnética del medio, donde ambas constantes aparecen en las leyes de la electricidad y el magnetismo.

Este dato, coincidente con el valor de la velocidad de la luz, supuso considerar a la luz como una onda electromagnética y **unificar**, mediante las ecuaciones de Maxwell, tres áreas de la física: **la electricidad, el magnetismo y la óptica**.

1.7. PROBLEMAS RESUELTOS

1. Determina el flujo magnético a través de una espira cuadrada de 12,5 cm de lado que se encuentra situada en un campo magnético uniforme de 0,4 T si el eje de la espira forma un ángulo de 30° con las líneas de campo.

Teniendo en cuenta la superficie de la espira y que el campo magnético es constante, el flujo magnético nos queda,

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S} = BS \cos \alpha = 0,4 \cdot 56 \cdot 10^{-2} \cos 30^\circ = 5,41 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

2. Un alambre de 10 cm de longitud se mueve con una velocidad de 0,5 m/s en un campo magnético de 0,2 T. Calcula
 - a) La fem inducida en el alambre si éste, se mueve perpendicularmente al campo.
 - b) La fem inducida en el alambre si éste, se mueve formando un ángulo de 30° respecto al campo.

La fem coincide con la diferencia de potencial que se induce entre los extremos del conductor, por tanto:

- a) Al ser la velocidad del conductor perpendicular a la inducción del campo magnético, la fem será máxima:

$$\varepsilon = Blv = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,01 \text{ V}$$

- b) En este caso, la velocidad y el campo forman un ángulo de 30° y la fem será,

$$\varepsilon = Blv \sin 30^\circ = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot \sin 30^\circ = 5 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

3. Una bobina está formada por 300 espiras circulares de 15 cm de radio. Calcula la fem máxima inducida si se hace girar la bobina con una frecuencia de 50 Hz en un campo magnético de 0,05 T.

Una bobina que gira con una velocidad angular constante en un campo magnético uniforme induce una fem sinusoidal dada por,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

siendo $\varepsilon_0 = NBS\omega$ la fem máxima.

Hallando la velocidad angular, $\omega = 2\pi t = 314 \text{ rad/s}$, y la superficie de la espira, $S = \pi r^2 = 0,07 \text{ m}^2$, el valor de la fem máxima es,

$$\varepsilon_0 = NBS\omega = 300 \cdot 0,05 \cdot 0,07 \cdot 314 = 330 \text{ V}$$

4. Una bobina de 100 espiras circulares de 1 cm de radio se halla en el seno de un campo magnético uniforme de 0,5 T, de modo que el plano de las espiras es perpendicular al campo.

- Determina el flujo magnético en la bobina.
 - Halla el valor de la fem media inducida al girar la bobina 90° respecto a un eje perpendicular en una milésima de segundo.
 - ¿En cuánto tiempo debería girar la bobina 45° para conseguir la misma fem?
- a) El flujo a través de una bobina compuesta por N espiras es igual a N veces el flujo a través de cada espira individual

$$\Phi = N\vec{B}\vec{S} = NBS = 100 \cdot 0,5 \cdot (\pi \cdot 0,01^2) = 0,016 \text{ Wb}$$

b) Al girar la espira 90° , el flujo final es cero ya que el $\cos 90^\circ = 0$. Por tanto,

$$\varepsilon_0 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0,016}{0,001} = 16 \text{ V}$$

c) Hallando el flujo final y despejando el tiempo de la fem, obtenemos el resultado pedido.

$$\Phi = NBS \cos 45^\circ \Rightarrow \varepsilon_0 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = -\frac{0,011 - 0,016}{16} = 3,13 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$