

# Unidad IV

## **Electromagnetismo**

El electromagnetismo es una rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Michael Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Clerk Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como ecuaciones de Maxwell.

El electromagnetismo es una teoría de campos; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales o tensoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable sólo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la mecánica cuántica.

El electromagnetismo considerado como fuerza es una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo actualmente conocido.

### **4.1. Fuerza electromotriz inducida.**

La fuerza electromotriz (FEM) es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico. Con carácter general puede explicarse por la existencia de un campo

electromotor  $\xi$  cuya circulación,  $\int_S \xi ds$ , define la fuerza electromotriz del generador.

Se define como el trabajo que el generador realiza para pasar por su interior la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo, dividido por el valor en Culombios de dicha carga.

Esto se justifica en el hecho de que cuando circula esta unidad de carga por el circuito exterior al generador, desde el polo positivo al negativo, es necesario realizar un trabajo o consumo de energía (mecánica, química, etcétera) para transportarla por el interior desde un punto de menor potencial (el polo negativo al cual llega) a otro de mayor potencial (el polo positivo por el cual sale).

La FEM se mide en voltios, al igual que el potencial eléctrico.

Por lo que queda que:

$$P = \frac{R}{A}$$

Se relaciona con la diferencia de potencial  $V$  entre los bornes y la resistencia interna  $r$  del generador mediante la fórmula  $E = V + Ir$  (el producto  $Ir$  es la caída de potencial que se produce en el interior del generador a causa de la resistencia óhmica que ofrece al paso de la corriente). La FEM de un generador coincide con la diferencia de potencial en circuito abierto.

La fuerza electromotriz de inducción (o inducida) en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción  $\phi$  del campo magnético que lo atraviesa en la

unidad de tiempo, lo que se expresa por la fórmula  $\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  (Ley de Faraday). El signo - (Ley de Lenz) indica que el sentido de la FEM inducida es tal que se

opone al descrito por la ley de Faraday ( $\xi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ).

#### 4.2. Ley de Faraday.

La ley de inducción electromagnética de Faraday (o simplemente ley de Faraday) establece que el voltaje inducido en un circuitocerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde:<sup>2</sup>

(\*)

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico,  $d\vec{l}$  es el elemento infinitesimal del contorno  $C$ ,  $\vec{B}$  es la densidad de campo magnético y  $S$  es una superficie arbitraria, cuyo borde es  $C$ . Las direcciones del contorno  $C$  y de  $d\vec{A}$  están dadas por la regla de la mano derecha.

Esta ley fue formulada a partir de los experimentos que Michael Faraday realizó en 1831. Esta ley tiene importantes aplicaciones en la generación de electricidad

### 4.3. Ley de Lenz.

La ley de Lenz para el campo electromagnético relaciona cambios producidos en el campo eléctrico en un conductor con la variación de flujo magnético en dicho conductor, y afirma que las tensiones o voltajes inducidos sobre un conductor y los campos eléctricos asociados son de un sentido tal que se oponen a la variación del flujo magnético que las induce. Esta ley se llama así en honor del físico germano-báltico Heinrich Lenz, quien la formuló en el año 1834. En un contexto más general que el usado por Lenz, se conoce que dicha ley es una consecuencia más del principio de conservación de la energía aplicado a la energía del campo electromagnético.

La polaridad de una tensión inducida es tal, que tiende a producir una corriente, cuyo campo magnético se opone siempre a las variaciones del campo existente producido por la corriente original.

El flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano viene dado por:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS \cos \alpha,$$

donde:

$\Phi$  = Flujo magnético. La unidad en el SI es el weber (Wb).

$\mathbf{B}$  = Inducción magnética. La unidad en el SI es el tesla (T).

$S$  = Superficie definida por el conductor.

$\alpha$  = Ángulo que forman el vector  $S$  perpendicular a la superficie definida por el conductor y la dirección del campo.

Si el conductor está en movimiento el valor del flujo será:

$$\Phi = \int_S B \cos \alpha dS$$

A su vez, el valor del flujo puede variar debido a un cambio en el valor del campo magnético:

$$d\Phi = dB \cdot S \cdot \cos(\alpha).$$

En este caso la Ley de Faraday afirma que la tensión inducida  $\mathcal{E}$  en cada instante tiene por valor:

$$\mathcal{E} = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

Donde  $\mathcal{E}$  es el voltaje inducido y  $d\Phi/dt$  es la tasa de variación temporal del flujo magnético  $\Phi$ . La dirección voltaje inducido (el signo negativo en la fórmula) se debe a la oposición al cambio de flujo magnético.

#### 4.4. Ecuaciones de Maxwell.

Las **ecuaciones de Maxwell** son un conjunto de cuatro ecuaciones (originalmente 20 ecuaciones) que describen por completo los fenómenos electromagnéticos. La gran contribución de James Clerk Maxwell fue reunir en estas ecuaciones largos años de resultados experimentales, debidos a Coulomb, Gauss, Ampere, Faraday y otros, introduciendo los conceptos de campo y corriente de desplazamiento, y unificando los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto: el campo electromagnético

Las ecuaciones de Maxwell como ahora las conocemos son las cuatro citadas anteriormente y a manera de resumen se pueden encontrar en la siguiente tabla:

Nombre	Forma diferencial	Forma integral
Ley de Gauss:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss para el campo magnético:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
Ley de Faraday:	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$
Ley de Ampère generalizada:	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \vec{\nabla} \times \vec{A}$	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$

Estas cuatro ecuaciones junto con la fuerza de Lorentz son las que explican cualquier tipo de fenómeno electromagnético. Una fortaleza de las ecuaciones de Maxwell es que permanecen invariantes en cualquier sistema de unidades, salvo de pequeñas excepciones, y que son compatibles con la relatividad

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

especial y general. Además Maxwell descubrió que la cantidad  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  era simplemente la velocidad de la luz en el vacío, por lo que la luz es una forma de radiación electromagnética. Los valores aceptados actualmente para la velocidad de la luz, la permitividad y la permeabilidad magnética se resumen en la siguiente tabla:

Símbolo	Nombre	Valor numérico	Unidad de medida SI	Tipo
$c$	Velocidad de la luz en el vacío	$2,99792458 \times 10^8$	metros por segundo	definido
$\epsilon_0$	Permitividad	$8,854 \times 10^{-12}$	faradios por metro	derivado
$\mu_0$	Permeabilidad magnética	$4\pi \times 10^{-7}$	henrios por metro	definido