

Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Tema 1. Electromagnetismo. Parte II. Campo Magnético

Isabel M. Tienda Luna

Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores
Universidad de Granada

isabelt@ugr.es

Doble Grado en Informática y ADE - Doble Grado en Informática y
Matemáticas
Curso 2019-2020

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

Un poco de historia...

- **Oersted** (1820). Las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.



- **Faraday** (1832). Los campos magnéticos son capaces de inducir movimiento de cargas.

Un poco de historia...

Ampère sienta las bases del Electromagnetismo:

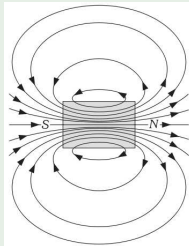
- 1 Las cargas en movimiento producen interacciones electromagnéticas además de las eléctricas dadas por la ley de Coulomb.
- 2 Toda carga en movimiento produce un campo magnético que actúa sobre otra carga sólo si ésta está también en movimiento.
- 3 Un campo magnético sólo es capaz de actuar sobre cargas en movimiento.
- 4 Se dice que en una región hay un campo magnético cuando una carga en movimiento experimenta una fuerza.
- 5 El campo magnético cumple el principio de superposición.
- 6 El magnetismo natural es consecuencia también de cargas en movimiento.



Conceptos fundamentales

- Imanes.
- Polos.
- Líneas de inducción magnética.
 - 1 La dirección del campo (\vec{B}) es tangente a las líneas de inducción.
 - 2 En imanes: salen del polo N y entran al polo S.
 - 3 En corrientes rectilíneas: son circunferencias con centro en el conductor.
 - 4 Son cerradas \Rightarrow en imanes, los polos no pueden separarse.
 - 5 Líneas terrestres.

Imán



Corriente



- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica**
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

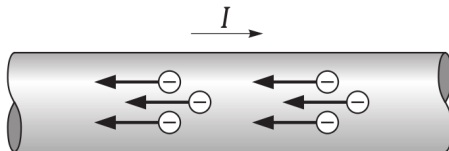
Conceptos

Corriente Eléctrica

La **corriente eléctrica** es el conjunto de las cargas que circulan a través de un conductor. La **conducción**, es el proceso por el cual la carga se transporta.

Convenio

Convenimos en asignar el sentido de la corriente eléctrica al que tienen los portadores de carga positiva. Como la corriente eléctrica está producida por un campo eléctrico, ésta tiene el mismo sentido que el campo.

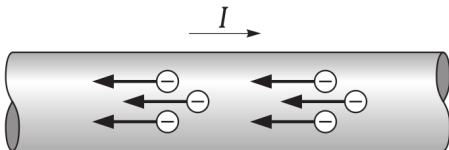


Intensidad de corriente

Intensidad de corriente

La **intensidad de corriente** es la velocidad a la que se transporta la carga por un punto dado en un sistema conductor. Es la cantidad de carga por unidad de tiempo que atraviesa un conductor.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \left(\frac{\text{Culombio}}{\text{segundo}} = \text{Amperio} \right) \quad (1)$$



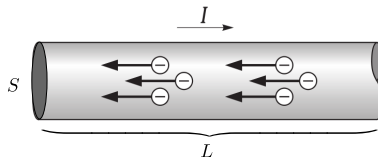
Efecto	Corriente
Quemaduras Graves	0.5 A
Detención de respiración	0.3 A
Imposibilidad de desprenderse	0.05 A
Cosquilleo	10 mA
Umbral de sensación	1 mA

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

Resistencia eléctrica

Definición de Resistencia

La resistencia es la medida de la oposición de los hilos conductores al movimiento de los electrones en su seno.



Para un conductor rectilíneo de longitud L , superficie transversal S y resistividad ρ (inversa de la conductividad σ),

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

Sus unidades con los Ohmios (Ω)

Ley de Ohm

Definición de Resistencia

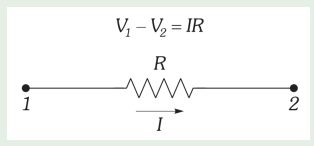
La resistencia es la medida de la oposición de los hilos conductores al movimiento de los electrones en su seno.



Ley de Ohm

$$V_1 - V_2 = IR \quad (3)$$

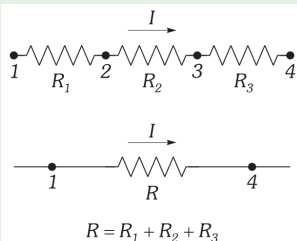
Representación en un circuito



- La resistencia depende de la temperatura. ¿Aumenta o disminuye con T?

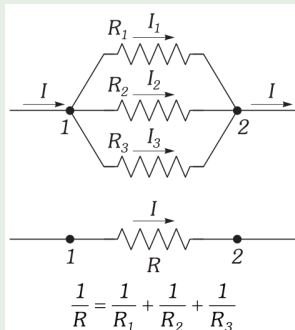
Asociación de resistencias

Asociación serie



- Misma intensidad
- Diferente diferencia de potencial

Asociación paralelo



- Diferente intensidad
- Misma diferencia de potencial

Resistencias

- Resistencias **variables**: cajas de resistencias y potenciómetros.
- **Energía consumida** por una corriente (U) que atraviesa una resistencia.
La caída de potencial ($V_1 - V_2$) entre dos puntos de un hilo conductor es la pérdida de energía potencial de la unidad de carga, cuando pasa de un punto a otro. Si la carga transportada es q , la pérdida de energía potencial U será:

$$U = I(V_1 - V_2)t = I^2 R t = \frac{(V_1 - V_2)^2}{R} t \quad (4)$$

- **Potencia consumida** por una corriente que atraviesa una resistencia
Es la energía de la corriente en cada unidad de tiempo. Su unidad es el Vatio (W).

$$P = I(V_1 - V_2) = I^2 R = \frac{(V_1 - V_2)^2}{R} \quad (5)$$

- Kilovatio-hora.
- **Efecto Joule**. Es la transformación de la energía eléctrica en calorífica, al circular una corriente por un conductor. $U = I^2 R t$

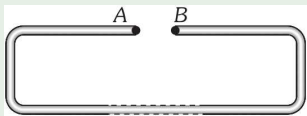
- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz**
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

Fuerza electromotriz

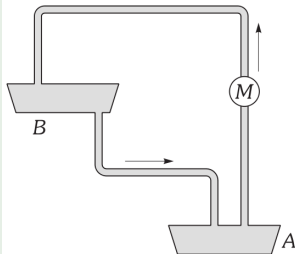
Fuerza electromotriz

La **fuerza electromotriz** (fem) (ε) es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor o de producir una corriente eléctrica que lo atraviese.

Electrostática



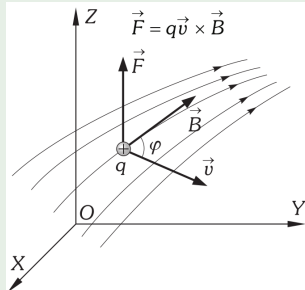
Símil hidrodinámico



- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.**
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz

Carga móvil



Fuerza experimentada por una **carga puntual en movimiento**:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (6)$$

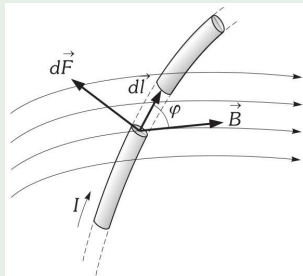
- Unidades de \vec{B} : *Tesla*, $\frac{\text{Weber}}{\text{m}^2}$
- Módulo de la fuerza : $qvB \sin \varphi$
- Dirección y sentido de la fuerza: *regla de la mano derecha*

Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz

Fuerza experimentada por una **corriente**:

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B} \quad (7)$$

Corriente



- Módulo de la fuerza : $IlB \sin \varphi$
- Dirección y sentido de la fuerza: *regla de la mano derecha*
- Si \vec{l} cambia, $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$
- Si \vec{l} y $\vec{B}(\vec{r})$ cambian, $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$

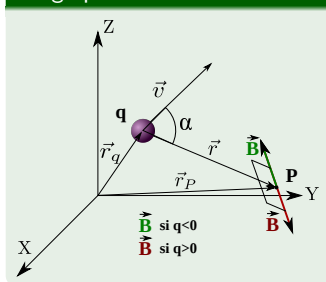
\Downarrow

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r}) \quad (8)$$

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart**
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción

Campo creado por una carga puntual en movimiento

Carga puntual en movimiento



Vector Inducción Magnética en P:

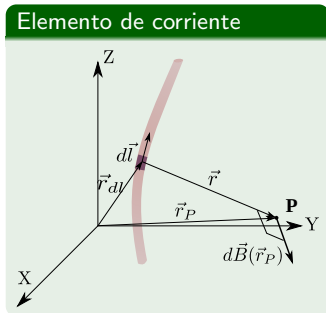
$$\vec{B}(\vec{r}_P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times (\vec{r}_P - \vec{r}_q)}{|\vec{r}_P - \vec{r}_q|^3} \quad (T) \quad (9)$$

$$\vec{B}(\vec{r}_P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{e}_r}{r^2} \quad (10)$$

- Permeabilidad magnética (μ [N/A^2]): capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos.
- Módulo, dirección y sentido.

Campo creado por un elemento de corriente: Ley de Biot y Savart

La ley de Biot y Savart permite calcular la **inducción magnética** producida por un elemento de la corriente estacionaria I de longitud $d\vec{l}$ en un punto **P** del espacio. El vector resultante, $d\vec{B}(\vec{r}_P)$, es perpendicular a los vectores $d\vec{l}$ (tangente al conductor y en el sentido de I) y $\vec{r} = \vec{r}_P - \vec{r}_{dl}$.



Ley de Biot y Savart expresada matemáticamente:

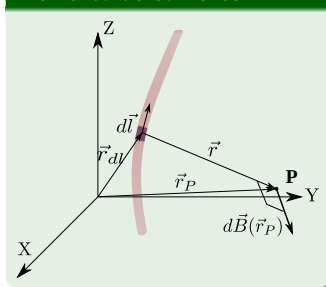
$$d\vec{B}(\vec{r}_P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times (\vec{r}_P - \vec{r}_{dl})}{|\vec{r}_P - \vec{r}_{dl}|^3} \quad (T) \quad (11)$$

$$d\vec{B}(\vec{r}_P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{e}_r}{r^2} \quad (12)$$

Campo creado por un elemento de corriente: Ley de Biot y Savart

$$d\vec{B}(\vec{r}_P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times (\vec{r}_P - \vec{r}_{dl})}{|\vec{r}_P - \vec{r}_{dl}|^3} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{e}_r}{r^2}$$

Elemento de corriente



- Para calcular el vector Inducción Magnética total ($\vec{B}(\vec{r}_P)$) creado por todo el conductor aplicamos el Principio de superposición.
- Si tenemos un conductor finito: sumo las contribuciones de todos los trozos de conductor \Rightarrow uso \int .
- Aplicable a cargas en movimiento \Rightarrow sustituyo $Id\vec{l}$ por $q\vec{v}$.

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère**
- 8 Fenómenos de autoinducción

¿Hay alguna forma más fácil de calcular el campo?

Si, pero primero algunas propiedades del campo magnético:

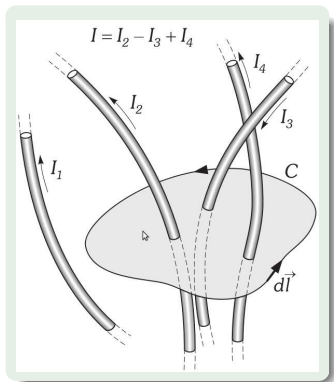
- El origen del campo magnético está en las corrientes eléctricas y por tanto no existen ni fuentes ni sumideros de campo magnético aislados, es decir, las líneas de campo son siempre cerradas. Por tanto:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (13)$$

- No podemos usar la ley de Gauss para el campo magnético.
- El campo magnético **no es conservativo**, por tanto su circulación a lo largo de una línea cerrada no es cero. No podemos definir potencial.

Ley de Ampère

En un campo magnético, la circulación del vector inducción a lo largo de una curva cerrada C es igual a μ_0 veces la intensidad de corriente que corta el área de dicha curva.

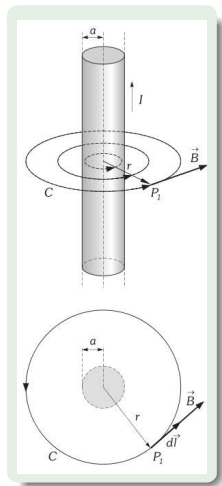


$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (14)$$

- La ley de Ampère sólo es válida para corrientes estacionarias
- En el ejemplo:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_2 - I_3 + I_4)$$
- Para poner signo a las corrientes usamos la regla de la mano derecha

Ejemplos de aplicación



- Si $r > a$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_C B dl = B \oint_C dl = B 2\pi r$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- Si $r < a$

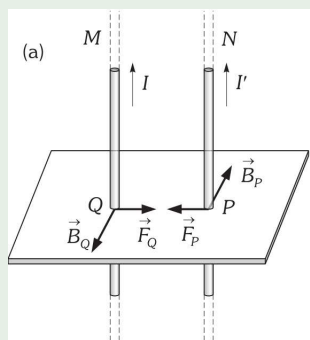
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_C B dl = B \oint_C dl = B 2\pi r$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I' \text{ con } I' = I \frac{\pi r^2}{\pi a^2}$$

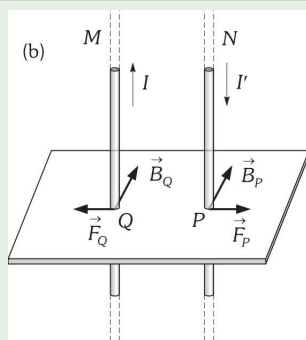
$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi a^2}$$

Fuerzas entre corrientes paralelas

Mismo sentido



Sentido opuesto

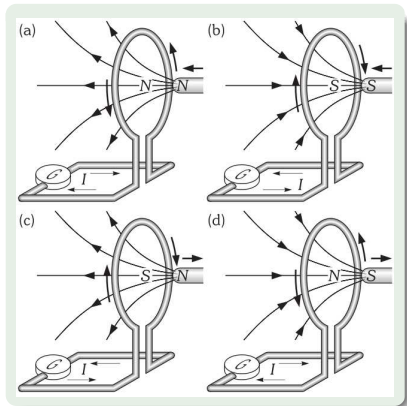


- Las corrientes en el mismo sentido se atraen
- Las corrientes en sentidos opuestos se repelen

- $$F = \frac{\mu_0 I I' l}{2\pi a}$$

- 1 Introducción
- 2 Corriente Eléctrica
- 3 Ley de Ohm. Resistencia.
- 4 Fuerza Electromotriz
- 5 Vector Inducción Magnética. Fuerza de Lorentz.
- 6 Cálculo del vector Inducción Magnética: Ley de Biot y Savart
- 7 Ley de Ampère
- 8 Fenómenos de autoinducción**

Experiencias de Faraday



- Sólo hay corriente mientras que haya movimiento relativo espira-imán
- Cesa la corriente si cesa el movimiento
- La corriente se produce por una fuerza electromotriz llamada *fem inducida* que depende de la intensidad del campo magnético y de su sentido
- **Explicación:** las corrientes inducidas se deben a las variaciones del flujo magnético

Ley de Lenz

Ley de Lenz

El flujo producido por la corriente inducida se opone a la variación del flujo inductor.



Si se produce una variación de flujo, dicha variación induce una corriente (**corriente inducida**) cuyo sentido es tal que tiende a oponerse a la causa que originó la variación de flujo: **principio de acción-reacción del electromagnetismo**.

Ley de Faraday

Ley de Faraday

Siempre que varía el flujo magnético que atraviesa un circuito, se origina en él una **corriente inducida**. La **fuerza electromotriz de inducción** que origina dicha corriente inducida es el valor de la velocidad de variación del flujo. La corriente de inducción existe mientras existe variación de flujo.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (15)$$

¿Por qué puede variar el flujo ($\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$)?

- 1 Porque cambie \vec{B} .
- 2 Porque cambie \vec{S} .
- 3 Porque cambie el ángulo entre \vec{B} y \vec{S} .

Autoinducción

¿Qué ocurriría si tengo un conductor y hago variar la corriente que lo atraviesa?

Si uso la ley de Lenz, aparecerá una corriente (**corriente inducida**) que se opondrá a dichas variaciones.

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

Autoinducción

Se produce el fenómeno de **autoinducción** en un conductor cuando se forman en él corrientes inducidas debidas a las variaciones de flujo en el propio conductor.

Autoinducción

El flujo magnético ($\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$) que atraviesa a un circuito aislado depende de:

- ① sus parámetros geométricos (\vec{S})
- ② de la corriente que lo recorre porque \vec{B} depende de la corriente
- ③ del ángulo entre \vec{B} y \vec{S}

Para un **circuito rígido** (no varía su superficie ni el ángulo entre \vec{B} y \vec{S}), los cambios de flujo se deben a los cambios de \vec{B} causados por los cambios de corriente:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dI} \frac{dI}{dt} \quad (16)$$

Autoinducción

Para un **circuito rígido**

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dI} \frac{dI}{dt} \quad (17)$$

Coeficiente de autoinducción de un circuito es la variación que experimenta el flujo a través del circuito debida a las variaciones de la corriente que lo recorre y depende únicamente de los parámetros geométricos del circuito

$$L = \frac{d\phi}{dI} \quad (18)$$

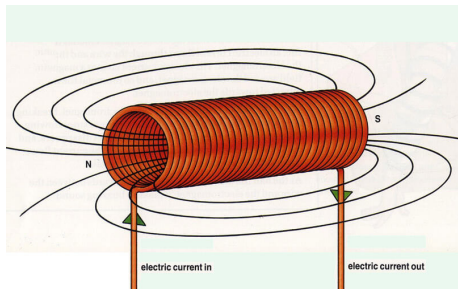
Autoinducción

- **L** se mide en Henrys. Un **Henry** es la autoinducción de un conductor en el cual la variación de la corriente en un amperio por segundo induce una fem de un voltio.

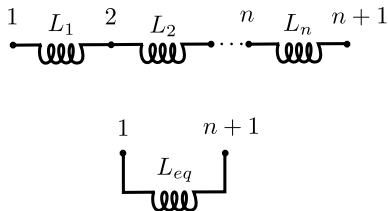
$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (19)$$

- Ejemplo: Bobina

- Partimos de $\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$
- Como $\phi = BS$ y $B = \frac{\mu NI}{l}$
- Entonces $\varepsilon = -\frac{\mu N^2 S}{l} \frac{dI}{dt}$
- Resultando que $L = \frac{\mu N^2 S}{l}$



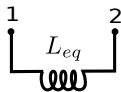
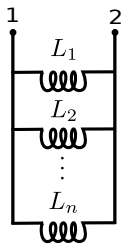
Autoinducciones como elementos de circuitos



- Se realiza uniendo una autoinducción con la siguiente
- La autoinducción equivalente se calcula como la suma de las autoinducciones de la asociación.
- Autoinducción equivalente de la asociación en serie:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (20)$$

Autoinducciones como elementos de circuitos



- Se realiza uniendo todos los extremos de un lado de todas las autoinducciones de la asociación entre sí (punto 1) y todos los extremos opuestos de las autoinducciones de la asociación entre sí (punto 2).
- La autoinducción equivalente se calcula usando la suma de inversos.
- Autoinducción equivalente de la asociación en paralelo:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (21)$$

Bibliografía

Algunos libros útiles para estudiar los contenidos de este tema son:

- Física General (Burbano). Capítulos XXI y XXII.
- Fundamentos Físicos y Tecnológicos de la Informática (Gómez). Capítulo 3.
- Física para Ciencias e Ingenierías Vol II (Serway). Parte I.
- Física (Sears). Temas 25, 27, 28, 29 y 30.
- Apuntes prof. David Blanco. Tema 7.

Nota: Todos estos libros cuentan con ejemplos de aplicación resueltos útiles para adquirir los distintos conceptos tratados en este tema.