

Universidad  
Continental

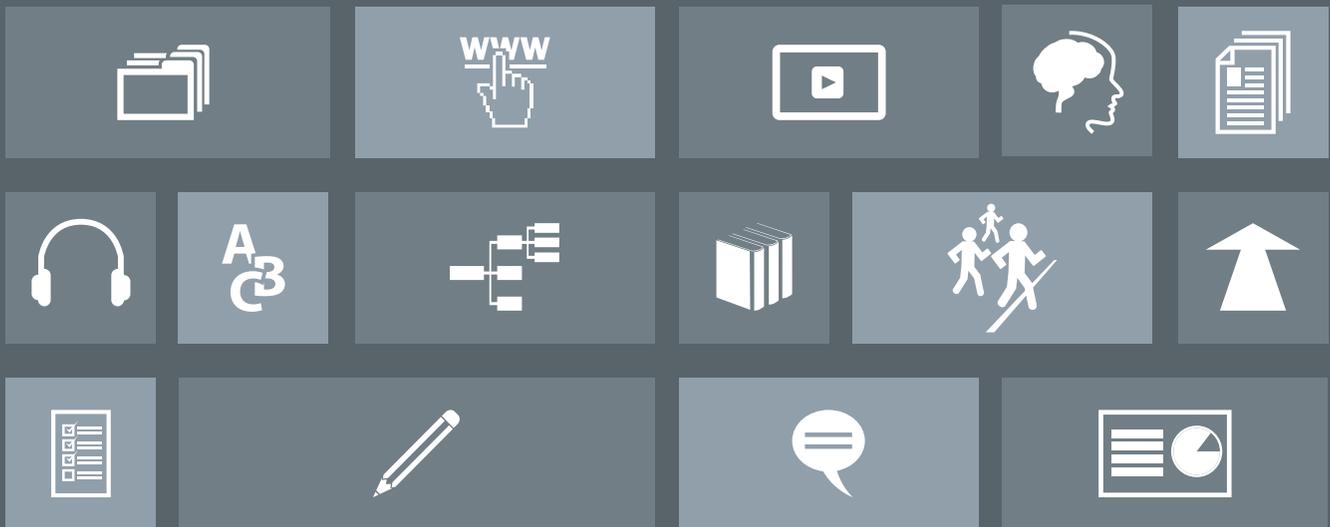


# Física II

Manual Autoformativo Interactivo

---

Zonia Tello Berenstein



Datos de catalogación bibliográfica

--

*Física II. Manual Autoformativo Interactivo*

Zonia Tello Berenstein

Primera edición

Huancayo, marzo de 2017

De esta edición

© Universidad Continental

Av. San Carlos 1980, Huancayo-Perú

Teléfono: (51 64) 481-430 anexo 7361

Correo electrónico: [recursosucvirtual@continental.edu.pe](mailto:recursosucvirtual@continental.edu.pe)

<http://www.continental.edu.pe/>

Versión e-book

Disponible en <http://repositorio.continental.edu.pe/>

ISBN electrónico N.º 978-612-4196-

Dirección: Emma Barrios Ipenza

Edición: Eliana Gallardo Echenique

Asistente de edición: Andrid Poma Acevedo

Asesoría didáctica: Fernando Ñaupari Rafael

Corrección de textos: Sara Maricruz Bravo Montenegro

Diseño y diagramación: Francisco Rosales Guerra

Todos los derechos reservados. Cada autor es responsable del contenido de su propio texto.

Este manual autoformativo no puede ser reproducido, total ni parcialmente, ni registrado en o transmitido por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotográfico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia, o cualquier otro medio, sin el permiso previo de la Universidad Continental.

# ÍNDICE

 INTRODUCCIÓN	9
 DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA	10
 RESULTADO DE APRENDIZAJE	10
 UNIDADES DIDÁCTICAS	10
 TIEMPO MÍNIMO DE ESTUDIO	10
<b>UNIDAD I</b> M.A.S., FLUIDOS, ONDAS Y TERMODINÁMICA	11
 DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD I	11
ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES	12
 TEMA N° 1: MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (M.A.S)	13
1. ENERGÍA EN EL M.A.S.:	15
2. APLICACIONES DEL M.A.S.:	15
3. PÉNDULO SIMPLE Y FÍSICO:	16
 TEMA N° 2: MECÁNICA DE FLUIDOS	19
1. DENSIDAD Y PRESIÓN:	19
2. PRINCIPIO DE PASCAL	20
3. FUERZA SOBRE SUPERFICIES SUMERGIDAS	23
4. PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES	23
5. HIDRODINÁMICA	23
 LECTURA SELECCIONADA N° 1: LA MEDICIÓN DEL TIEMPO	25
 ACTIVIDAD FORMATIVA N° 1	26
 TEMA N° 3: ONDAS MECÁNICAS	27
1. TIPOS DE ONDAS MECÁNICAS	27
2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE UNA ONDA Y RAPIDEZ DE UNA ONDA TRANSVERSAL	28
3. ENERGÍA DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO	30
4. ONDAS ESTACIONARIAS	30
5. EL SONIDO Y EL OÍDO	32
 TEMA N° 4: TERMODINÁMICA	34
1. TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO	34

2.	CALORIMETRÍA Y CAMBIOS DE FASE	35
3.	ENERGÍA INTERNA Y LA TRASFERENCIA DE CALOR	36
4.	PRIMERA LEY DE TERMODINÁMICA	37
5.	PROCESOS TERMODINÁMICOS	38
	GLOSARIO DE LA UNIDAD I	40
	BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD I	41
	AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD I	42

## UNIDAD II ELECTROSTÁTICA 45

	DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD II	45
---	--	----

	TEMA N.º 1: CARGA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO	47
---	---	----

1.	CARGA ELÉCTRICA	47
2.	LEY DE COULOMB	48
3.	FUERZA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO PARA CARGAS PUNTUALES	48
4.	FUERZA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO PARA CARGAS DISTRIBUIDAS	49
5.	DIPOLos ELÉCTRICOS	52

	TEMA N.º 2: LEY DE GAUSS	53
---	--------------------------	----

1.	CARGA Y FLUJO ELÉCTRICO	53
2.	CÁLCULO DEL FLUJO ELÉCTRICO	53
3.	LEY DE GAUSS	55
4.	APLICACIONES DE LA LEY DE GAUSS	55
5.	CARGAS EN CONDUCTORES	56

	ACTIVIDAD FORMATIVA N° 2	58
---	--------------------------	----

	TEMA N.º 3: POTENCIAL ELÉCTRICO	59
---	---------------------------------	----

1.	ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA	59
2.	POTENCIAL ELÉCTRICO	60
3.	CÁLCULO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO EN CARGAS PUNTUALES	61
4.	CÁLCULO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO EN CARGAS DISTRIBUIDAS	61
5.	SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES	61

	TEMA N.º 4: CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS	63
---	---	----

1.	CAPACITANCIA	63
----	--------------	----

	2. ASOCIACIÓN DE CAPACITORES	64
	3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	65
	4. DIELECTRICOS	66
	5. LEY DE GAUSS EN LOS DIELECTRICOS	68
	LECTURA SELECCIONADA N.º 2	68
	GLOSARIO DE LA UNIDAD II	69
	BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD II	70
	AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD II	71
 UNIDAD III	ELECTRODINÁMICA Y ELECTROMAGNETISMO	75
	DIAGRAMA DE ORGANIZACIÓN DE LA UNIDAD III	75
	ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES	76
	TEMA N.º 1: CORRIENTE, RESISTENCIA Y FUERZA ELECTROMOTRIZ	77
	1. CORRIENTE ELÉCTRICA	77
	2. DENSIDAD DE CORRIENTE (J)	77
	3. RESISTENCIA ELÉCTRICA	78
	4. LEY DE OHM	78
	5. FUERZA ELECTROMOTRIZ Y CIRCUITOS	79
	TEMA N.º 2: CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA	81
	1. RESISTORES EN SERIE Y PARALELO	81
	2. LEYES DE KIRCHHOFF	82
	3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA	83
	ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 5	85
	TEMA N.º 3: CAMPO MAGNÉTICO Y FUERZAS MAGNÉTICAS	87
	1. MAGNETISMO	87
	2. CAMPO MAGNÉTICO	87
	3. LÍNEAS DE CAMPO Y FLUJO MAGNÉTICO	88
	4. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CON CARGA EN UN CAMPO MAGNÉTICO	90
	5. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN CONDUCTOR QUE TRANSPORTA CORRIENTE	91
	6. FUERZA Y MOMENTO DE TORSIÓN EN UNA ESPIRA DE CORRIENTE	91
	7. EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	92

	TEMA N° 4: FUENTES DE CAMPO MAGNÉTICO	95
	1. CAMPO MAGNÉTICO DE UNA CARGA EN MOVIMIENTO, DE UN ELEMENTO DE CORRIENTE Y DE UN CONDUCTOR RECTO QUE TRANSPORTA CORRIENTE	95
	2. FUERZA ENTRE CONDUCTORES PARALELOS	97
	3. CAMPO MAGNÉTICO DE UNA ESPIRA CIRCULAR DE CORRIENTE	98
	4. LEY DE AMPERE Y SUS APLICACIONES	99
	TEMA N° 5: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	100
	1. EXPERIMENTO DE INDUCCIÓN	100
	2. LEY DE FARADAY	101
	3. LEY DE LENZ	101
	4. FUERZA ELECTROMOTRIZ DE MOVIMIENTO	102
	5. CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS	103
	LECTURA SELECCIONADA N° 3: MATERIALES MAGNÉTICOS HOY: ¿IMANES DE ÁTOMOS AISLADOS?	103
	ACTIVIDAD FORMATIVA N° 6	104
	GLOSARIO DE LA UNIDAD III	106
	BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD III	107
	AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD III	108
	<b>UNIDAD IV</b> CORRIENTE, ÓPTICA Y FÍSICA MODERNA	111
	DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD IV	111
	ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES	112
	TEMA N° 1: CORRIENTE ALTERNA	113
	1. CORRIENTE ALTERNA	113
	2. RESISTENCIA Y REACTANCIA	114
	3. POTENCIA EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA	118
	4. TRANSFORMADORES	119
	TEMA N.° 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	121
	1. ECUACIÓN DE MAXWELL Y O.E.M	121
	2. O.E.M. PLANAS	122

3.	O.E.M SINUSOIDALES	122
4.	ENERGÍA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO DE LAS O.E.M	123
5.	EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	123
	ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 1	124
	TEMA N.º 3: ÓPTICA	125
1.	NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN, REFLEXIÓN INTERNA TOTAL	125
2.	ÓPTICA GEOMÉTRICA E INSTRUMENTOS (ESPEJOS PLANOS Y ESFÉRICOS, LENTES DELGADAS)	126
3.	LALENTE DE AUMENTO	131
4.	MICROSCOPIOS Y TELESCOPIOS	132
5.	INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN	133
	TEMA N.º 4: FÍSICA MODERNA	137
1.	INVARIABILIDAD DE LAS LEYES FÍSICAS	137
2.	RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD	137
3.	RELATIVIDAD DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO	137
4.	RELATIVIDAD DE LA LONGITUD	138
5.	MASA RELATIVISTA	138
6.	TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ	139
7.	CANTIDAD DE MOVIMIENTO RELATIVISTA	139
8.	TRABAJO Y ENERGÍA RELATIVISTA	140
9.	MECÁNICA NEWTONIANA Y RELATIVIDAD	140
	LECTURA SELECCIONADA N.º 1: INVISIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA	141
	ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 2	141
	GLOSARIO DE LA UNIDAD IV	142
	BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD IV	143
	AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD IV	144
	ANEXO 1: SOLUCIONARIO DE LAS AUTOEVALUACIONES	147



 INTRODUCCIÓN

La física es una ciencia exacta que estudia las propiedades de la naturaleza, usando el lenguaje matemático. Además, utiliza el método científico y, gracias al entendimiento de sus leyes, nos ha permitido desarrollar los avances que ahora conocemos, como la energía eléctrica, los aviones y automóviles. Este curso de Física II es un curso de carácter obligatorio en la carrera y cuyos conocimientos permitirán al alumno comprender fenómenos físicos que han sido aprovechados por el hombre para conocer su entorno y desarrollar máquinas y herramientas que faciliten el desarrollo de sus actividades.

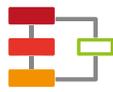
Esta asignatura de Física II está diseñada para contribuir al desarrollo del currículo. En esta se incluyen temas de conocimiento necesario, como son los siguientes: en la Unidad I, se tratará el movimiento armónico simple, que nos permite entender, por ejemplo, el funcionamiento de un reloj de péndulo; mecánica de fluidos, en cuyos principios se basa, por ejemplo, el gato hidráulico, de gran ayuda en levantamiento de peso; termodinámica, que es importante porque nos permite entender los procesos de transferencia de calor como forma de energía, cómo pro-

ducir trabajo con ellas; Unidad II, electrostática; en la Unidad III, electrodinámica y electromagnetismo; y, por último, en la Unidad IV, corriente alterna, óptica y física moderna, en cuyas bases reposa toda la tecnología que hoy usamos.

El manual es una guía que permitirá al estudiante conocer de manera didáctica, clara y lógica estos temas, desarrollar ejercicios y será un complemento a lo que el docente del curso desarrollará en su videoclase. Recuerde que este material, junto con las presentaciones animadas y las videoclases, son un todo y se complementan en la tarea de lograr que el alumno desarrolle las capacidades que plantea la materia.

Se invita al alumno a participar y ser un constructor activo de su propio conocimiento. La Universidad, a través de esta modalidad, le dará las herramientas necesarias para lograrlo; solo le pedimos tiempo, paciencia y perseverancia. Lea primero su manual, desarrolle sus actividades, realice sus autoevaluaciones, vea las videoclases, cumpla con sus actividades y el éxito será suyo.

La autora



## DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA



### RESULTADO DE APRENDIZAJE

Al término de la asignatura, el estudiante será capaz de interpretar los principios físicos del movimiento armónico simple, fluidos, termodinámica, electricidad, magnetismo, luz, óptica y la física relativista mediante los métodos de observación, conservación e interrelación con el medio ambiente, sustentado en un proyecto.



### UNIDADES DIDÁCTICAS

UNIDAD I	UNIDAD II	Unidad III	Unidad IV
M.A.S., fluidos, ondas y termodinámica	Electrostática	Electrodinámica y electromagnetismo	Corriente, óptica y física moderna.
V Resultado de aprendizaje	Resultado de aprendizaje	Resultado de aprendizaje	Resultado de aprendizaje
Resolver ejercicios de movimiento armónico simple, mecánica de fluidos, ondas mecánicas y termodinámica, demostrando dominio teórico y las consideraciones del sistema internacional de medidas.	Resolver problemas de carga eléctrica, campo eléctrico, ley de Gauss, potencial eléctrico, capacitancia y dieléctricos; empleando instrumentos, técnicas y fórmulas en un trabajo de laboratorio.	Resolver ejercicios y problemas sustentado en los principios de la electrodinámica y electromagnetismo, empleando instrumentos, técnicas y fórmulas en un trabajo de laboratorio.	Resolver ejercicios de corriente alterna y ondas electromagnéticas, tomando en cuenta los principios de la física moderna.



### TIEMPO MÍNIMO DE ESTUDIO

UNIDAD I	UNIDAD II	UNIDAD III	UNIDAD IV
Semana 1 y 2 24 horas	Semana 3 y 4 24 horas	Semana 5 y 6 24 horas	Semana 7 y 8 24 horas

UNIDAD I

M.A.S., FLUIDOS, ONDAS y TERMODINÁMICA

 DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD I



## ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES

### Resultado de aprendizaje de la Unidad I:

Al finalizar la unidad, el estudiante será capaz de resolver ejercicios de movimiento armónico simple, mecánica de fluidos, ondas mecánicas y termodinámica demostrando dominio teórico y las consideraciones del sistema internacional de medidas.

CONOCIMIENTOS	HABILIDADES	ACTITUDES
<p><b>Tema N.º 1: MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE M.A.S.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Energía del m.a.s.</li> <li>2 Aplicaciones del m.a.s.</li> <li>3 Péndulo simple y físico</li> </ol> <p><b>Tema N.º 2: MECÁNICA DE FLUIDOS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Densidad y presión de un fluido</li> <li>2 Principio de Pascal (manometría y vasos comunicantes)</li> <li>3 Fuerza sobre superficies sumergidas</li> <li>4 Principio de Arquímedes (flotación)</li> <li>5 Hidrodinámica (flujo de fluidos)</li> </ol> <p><b>Lectura seleccionada N.º 1:</b> "La medición del tiempo"</p> <p><b>Tema N.º 3: ONDAS MECÁNICAS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Tipos de ondas mecánicas y ondas periódicas</li> <li>2 Descripción matemática de una onda y rapidez de una onda transversal</li> <li>3 Energía del movimiento ondulatorio</li> <li>4 Ondas estacionarias en una cuerda</li> <li>5 Sonido y el oído</li> </ol> <p><b>Tema N.º 4: TERMODINÁMICA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Temperatura y equilibrio térmico</li> <li>2 Calorimetría y cambio de fase</li> <li>3 Energía interna y formas de variar la energía interna de una sustancia (transferencia de calor y desarrollando trabajo)</li> <li>4 Primera ley de la termodinámica</li> <li>5 Procesos termodinámicos</li> </ol> <p><b>Autoevaluación de la Unidad I</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza instrumentos, técnicas y fórmulas para aplicar el m.a.s., mecánica de fluidos, ondas mecánicas y termodinámica.</li> <li>• Resuelve ejercicios de m.a.s., mecánica de fluidos, ondas mecánicas y termodinámica.</li> <li>• Realiza experimentos en laboratorio.</li> <li>• Redacta correctamente los informes de laboratorio.</li> </ul> <p><b>Actividad N.º 1</b> Los estudiantes resuelven ejercicios.</p> <p><b>Control de lectura N.º 1</b> Evaluación de los temas n.º 1, 2, 3 y 4 más los contenidos de las lecturas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma conciencia del rol de ser estudiante universitario, de la puntualidad y respeto en el desarrollo de las clases.</li> <li>• Demuestra interés en los nuevos conocimientos y respeta la opinión de sus compañeros.</li> <li>• Juzga la importancia del cálculo en su quehacer cotidiano y profesional.</li> <li>• Trabaja individualmente y grupalmente.</li> </ul>



## TEMA N° 1: MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (M.A.S)

En el Universo muchos fenómenos son cíclicos: las estaciones, las olas del mar. El hombre desde siempre ha querido conocer todo acerca de su entorno, como las vibraciones, el lapso del tiempo. En esta búsqueda Galileo descubrió la ley de péndulo, permitiendo así que posteriormente se creara el reloj de péndulo, un ejemplo clásico de este movimiento.

Para iniciar el presente tema, se tiene presente que el movimiento armónico simple es la más sencilla representación de una oscilación. Estudiaremos su definición, representación, características y aplicaciones.

Para entender lo que significa el movimiento armónico simple, tenemos que recordar que un movimiento periódico es aquel que se repite en un periodo de tiempo y que se caracteriza por poseer un punto de equilibrio. Al sacarlo de este, existe una fuerza que lo retorna a su posición inicial en determinado tiempo. Si esta fuerza es proporcional al desplazamiento con respecto a su punto de equilibrio, entonces hablamos de m.a.s. Esto ocurre, por ejemplo, en los resortes ideales que obedecen a la ley de Hooke y cuya fuerza de restitución aplicada está representada por  $F = -Kx$ , siendo  $K$  la constante de restitución y  $x$  el desplazamiento. Una característica de este movimiento es que su desplazamiento puede ser representado con una función sinusoidal. Los elementos de este movimiento, son:

- Amplitud (A):** Es la distancia entre la posición de equilibrio y la distancia máxima que logra.
- Posición de equilibrio:** Centro del movimiento.
- Periodo (T):** Es lo que demora una oscilación completa, su unidad es el segundo.
- Frecuencia (f):** Número de oscilaciones en una unidad de tiempo, se da en Hz ( $s^{-1}$ ).
- Frecuencia angular (w):** Es  $2\pi$  veces la frecuencia. (rad/s)
- Ángulo  $\Phi$ :** ángulo donde se inicia el movimiento, tomado cuando el  $t=0$ , en relación con el eje  $x$ .

Para determinar su representación matemática, se relacionó el movimiento armónico simple del resorte ideal con el del movimiento circular uniforme, llegando a demostrar "que el movimiento armónico simple es la proyección del movimiento circular uniforme sobre un diámetro" (Young & Freedman, 2009) y encontrando que la frecuencia angular del m.a.s. era igual a la frecuencia angular del movimiento circular así:

$$\omega = 2\pi f$$

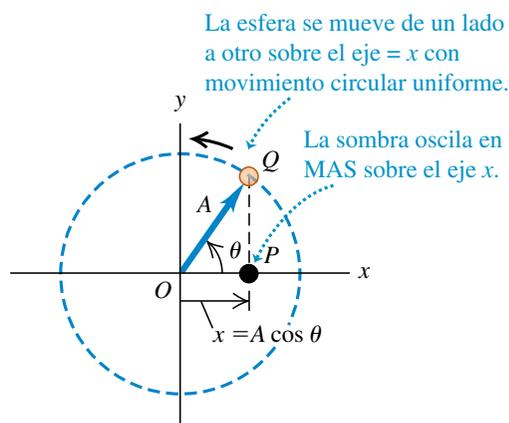


Figura 1. La sombra de la esfera representa el movimiento de un objeto unido a un resorte ideal.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 422.

Además, se descubrió que la rapidez angular está relacionada con la constante de la fuerza y la masa del objeto así:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{o bien,} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Si la última expresión es multiplicada por el periodo  $\omega T = T\sqrt{k/m}$ , pero  $T = 1/f$  y  $\omega = 2\pi f$ , entonces reemplazando quedaría  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ .

La representación matemática del desplazamiento por ser sinusoidal puede ser representada con la función sen o cos, tomando en cuenta la siguiente relación:

$$\cos \alpha = \sin(\alpha + \pi/2)$$

Tomando la representación usada por Hugh Young, para desplazamiento tenemos:

$$X = A \cos(\omega t + \Phi) \quad \text{recordando que } \omega t + \Phi = \theta$$

Donde  $A =$  amplitud,  $\omega =$  frecuencia angular,  $t =$  tiempo  $\Phi =$  ángulo de fase.

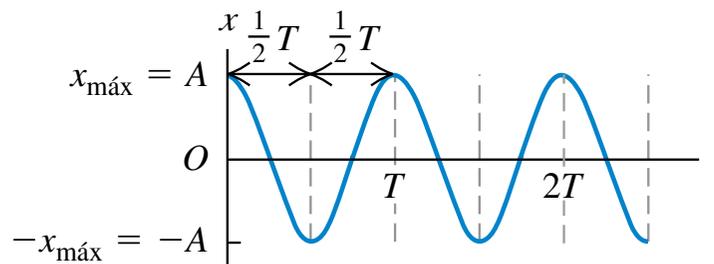


Figura 2. Representación de movimiento armónico simple.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 425.

Derivando la expresión de  $x$ , la velocidad será:

$$dx/dt = V = -\omega A \sin(\omega t + \Phi)$$

Otra expresión de velocidad que podemos usar es la siguiente:

$$v_x = \pm \sqrt{\frac{k}{m} \sqrt{A^2 - X^2}}$$

Cuando la velocidad es máxima, el desplazamiento es cero, entonces tenemos:

$$V_{\max} = \omega A$$

## 1. ENERGÍA EN EL M.A.S.:

Supongamos que un resorte ideal está ubicado de forma que su único desplazamiento es horizontal y que no existe trabajo en el eje  $y$ ; la masa al final del resorte tiene peso despreciable y su fuerza es conservativa.

En estas condiciones, la energía cinética está dada por  $E_c = \frac{1}{2} m v_x^2$  y la energía potencial  $U = \frac{1}{2} k x^2$ ; ya que la fuerza es conservativa, podemos afirmar que la energía total no varía, así tenemos:

$$E = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} k x^2 = \text{constante}$$

Cuando  $x=A$ , que es el desplazamiento máximo, la velocidad se hace cero, por lo que la expresión quedaría:

$$E = \frac{1}{2} k A^2 \text{ y esta es una constante.}$$

## 2. APLICACIONES DEL M.A.S.:

El m.a.s. se puede aplicar en cualquier sistema en el que exista una fuerza de restitución directamente proporcional al desplazamiento con respecto al equilibrio ( $F = -Kx$ ). Veamos los siguientes casos:

### 2.1. M.A.S. VERTICAL:

Se da cuando cuelga un resorte con un cuerpo de masa en el extremo. Para este sistema en equilibrio, se cumple:

$$K\Delta l = mg$$

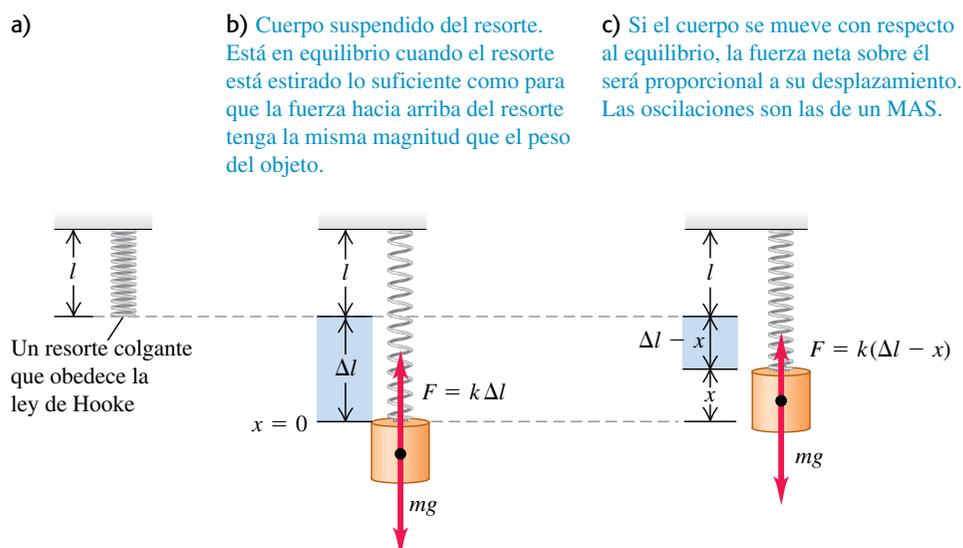


Figura 3. Representación gráfica del m.a.s. vertical.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 433.

Cuando el cuerpo se mueve hacia arriba y el desplazamiento es  $\Delta l - x$ , la fuerza neta será la siguiente:

$$F_{net} = k(\Delta l - x) + (-mg) = -kx$$

Lo mismo ocurrirá si el cuerpo se desplaza hacia abajo. En este caso vemos que la fuerza es proporcional a  $Kx$ , entonces estamos frente a un m.a.s.

## 2.2. M.A.S. ANGULAR: Por ejemplo, sucede en la rueda de balance de un reloj mecánico. Young & Freedman (2009) explican lo siguiente:

La rueda tiene un momento de inercia  $I$  alrededor de su eje. Un resorte en espiral ejerce una torca de restitución  $\tau_z$  proporcional al desplazamiento angular  $\theta$  con respecto a la posición de equilibrio. Escribimos  $\tau_z = -k\theta$ , donde  $k$  (la letra griega kappa) es una constante llamada "constante de torsión (p. 433).

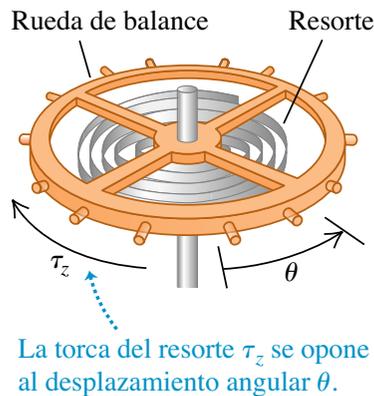


Figura 4. Representación de una rueda de balance.

Fuente: Young & Freedman, 2009, pg. 434.

Usando una analogía con la segunda ley de Newton, el movimiento queda representado por:

$$K\theta = I\alpha \quad \text{o bien,} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{K}{I}\theta$$

Fórmula que resulta igual a la de la aceleración en el movimiento armónico simple.

## 3. PÉNDULO SIMPLE Y FÍSICO:

### 3.1. Péndulo simple

Es un sistema formado por una pequeña masa atada al extremo de una cuerda de peso despreciable, que oscila en el plano vertical en un ángulo muy pequeño. Debido a esto su desplazamiento es un arco de radio  $l$ .

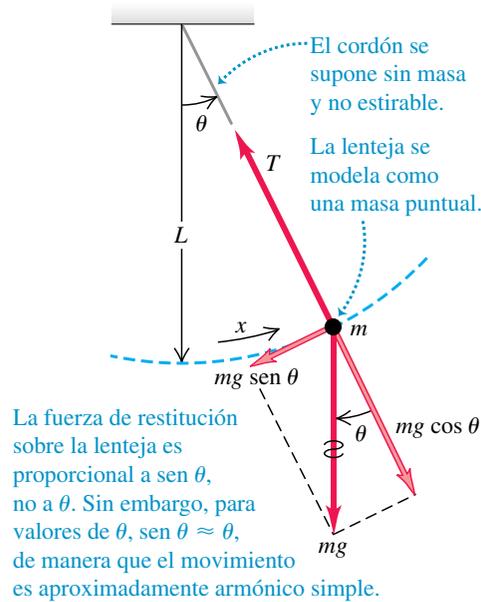


Figura 5. Diagrama de fuerzas de un péndulo simple.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 436.

La fuerza de restitución es tangencial al movimiento, si bien no es proporcional directamente a  $\theta$ , lo es a  $\text{sen } \theta$ , pero debido a que  $\theta$  es muy pequeño,  $\text{sen } \theta$  es casi  $\theta$

Y:

$$F_r = -mg \text{sen } \theta \text{ quedaría: } F_r = -mg\theta = -mgx/l$$

lo que la hace proporcional al desplazamiento para ángulos muy pequeños, por lo que se cumpliría también:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{mg|L}{m}} = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (\text{péndulo simple, amplitud pequeña})$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (\text{péndulo simple, amplitud pequeña})$$

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 437.

### 3.2. Péndulo físico

Es un péndulo real que usa un cuerpo de masa finita. Si las oscilaciones son pequeñas, su comportamiento será parecido al de un péndulo simple; en este caso, la masa gira alrededor de un eje sin fricción y en equilibrio. Asimismo, su centro de gravedad se encuentra debajo del pivote y, cuando la masa se desplaza, genera un torque de restitución igual a:

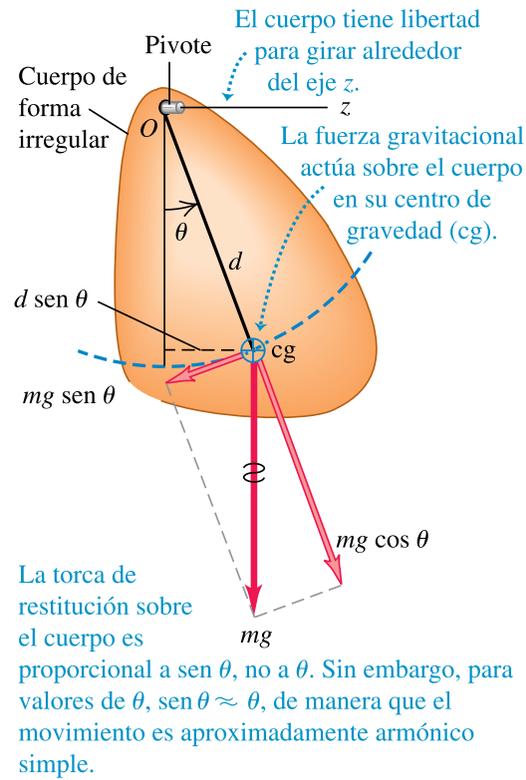


Figura 6. Péndulo físico.  
 Fuente: Young & Freeman, 2009, p. 438.

$$T_z = - (mg)(d \text{sen} \theta)$$

Cuando  $\theta$  es muy pequeño y  $\text{sen} \theta = \theta$ , entonces:  $t = -(mgd) \theta$ .

## TEMA N° 2: MECÁNICA DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos es la parte de la física que se ocupa del estudio del comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento. Muchas de las leyes que gobiernan este ámbito han permitido con el tiempo el desarrollo de tecnologías como la gata hidráulica, los ascensores hidráulicos, puentes levadizos, avances que no hubiesen sido posibles sin el descubrimiento de estos principios.

Los fluidos son sustancias con poca fuerza de enlace entre sus moléculas, lo que les da como característica la fluidez, que consiste en la propiedad de cambiar de forma constante cuando están sometidos a un esfuerzo cortante. La facilidad con la que un fluido se mueva nos dará lo que llamamos viscosidad. Son considerados fluidos los líquidos y los gases.

Ahora empezaremos con estática de los fluidos que estudia fluidos en reposo y conoceremos algunas de sus propiedades.

### 1. DENSIDAD Y PRESIÓN:

#### 1.1. Densidad:

Está definida como la masa sobre el volumen. Se aplica a todos los materiales sin importar su estado, así puede determinar la densidad del acero o del hielo. Cuando la constitución de un material es homogénea, el valor de la densidad será una constante en todo el compuesto.

Se denota con el símbolo griego  $\rho$ , y su unidad en el sistema internacional es  $\text{Kg/m}^3$ .

$$\rho = m/V$$

Tabla 1  
*Densidad de algunos materiales*

Material	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )*	Material	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )*
Aire (1 atm, 20°C)	1.20	Hierro, acero	$7.8 \times 10^3$
Etanol	$0.81 \times 10^3$	Latón	$8.6 \times 10^3$
Benceno	$0.90 \times 10^3$	Cobre	$8.9 \times 10^3$
Hielo	$0.92 \times 10^3$	Plata	$10.5 \times 10^3$
Agua	$1.00 \times 10^3$	Plomo	$11.3 \times 10^3$
Agua de mar	$1.03 \times 10^3$	Mercurio	$13.6 \times 10^3$
Sangre	$1.06 \times 10^3$	Oro	$19.3 \times 10^3$
Glicerina	$1.26 \times 10^3$	Platino	$21.4 \times 10^3$
Concreto	$2 \times 10^3$	Estrella enana blanca	$10^{10}$
Aluminio	$2.7 \times 10^3$	Estrella de neutrones	$10^{18}$

\*Para obtener las densidades en gramos por centímetro cúbico, divida entre  $10^3$ .

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 457.

La densidad en algunos materiales no es homogénea y puede variar en algunas partes del mismo; en estos casos se toma una densidad media.

Por otro lado, es necesario considerar que otros factores influyen en la densidad de los materiales como la presión y la temperatura.

Una medida que se usa y tiene relación con la densidad es la **gravedad específica** que es la relación entre la densidad del material y la del agua.

## 1.2. Presión:

Podemos definir presión como la magnitud física que mide la fuerza perpendicular por unidad de área. Recordemos que en los fluidos en reposo contenidos en un recipiente ejercen una fuerza perpendicular a las paredes del mismo. El símbolo que representa la presión es  $P$ , y su unidad en el sistema internacional es el Pascal (Pa): $N/m^2$ .

$$P=F/A$$

A continuación, veremos los tipos de presión:

**1.2.1. Presión atmosférica:** Se define como la presión ejercida por la columna de aire de la superficie terrestre en un área determinada, esta varía con la ubicación geográfica, el tiempo y la temperatura. La unidad más usada antes era mm de Hg (milímetro de mercurio), aunque ahora se uniformizó a Pascales.

Así tenemos que la presión atmosférica en Lima será mayor que en Puno debido a la altitud (msnm), esto debido a que "en capas bajas cerca de la superficie la disminución de la presión con la altura es de aproximadamente 1hPa cada 8m. Esta relación va disminuyendo a medida que la altura aumenta" (Peru, 2016).

**1.2.2. Presión hidrostática:** "Es aquella ejercida por los líquidos en reposo sobre objetos sumergidos en su interior" (Tf, 2010).

**1.2.3. Presión manométrica:** Es la diferencia entre presión absoluta y la presión atmosférica; si esta fuera negativa, estamos frente a una presión en vacío.

## 2. PRINCIPIO DE PASCAL

Hemos visto cuando se hablaba de presión atmosférica que esta varía con la altura. Ahora analicemos lo que pasa en un recipiente con líquido, suponiendo que la gravedad y la temperatura son constantes en el recipiente y el líquido:

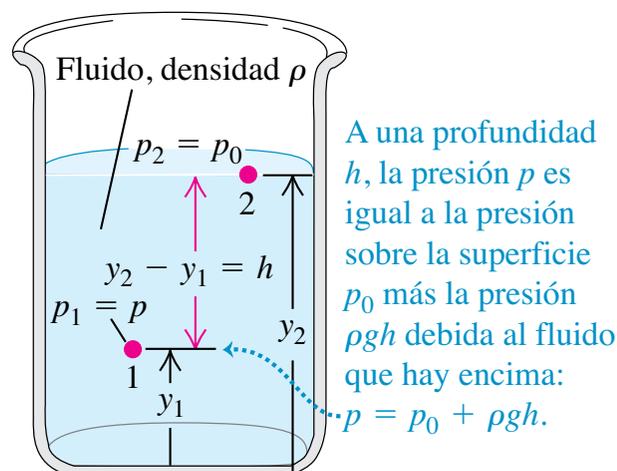


Figura 7. Representación de un recipiente con líquido.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 460.

Tenemos un objeto a una altura  $y_1$  del fondo del recipiente y a una distancia  $y_2 - y_1 = h$  de la superficie, entonces la presión a la altura  $h$  será igual a la presión en la superficie  $p_0$  más la presión del fluido que hay encima ( $\rho gh$ ):

$$P = P_0 + \rho gh$$

Observemos que esta presión no variará siempre que analicemos objetos a la misma altura.

Esto lo observó el científico Pascal y lo enunció así: "La presión aplicada a un fluido encerrado se transmite sin disminución a todas las partes del fluido y las paredes del recipiente".

Una aplicación de este principio es la prensa hidráulica:

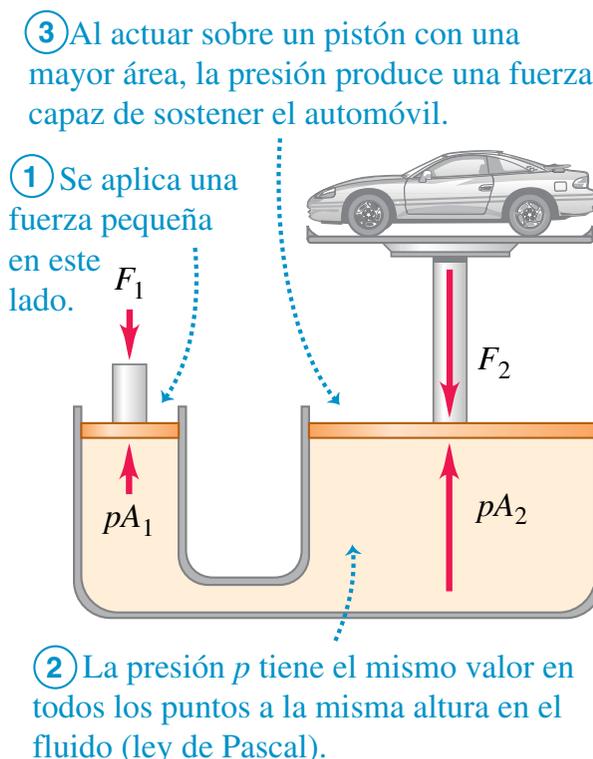


Figura 8. Representación de una prensa hidráulica.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 460.

La prensa hidráulica establece que la presión aplicada en el pistón pequeño se transmite al pistón grande en la misma magnitud, así:

$$F_1/A_1 = F_2/A_2$$

Esto ha permitido el desarrollo no solo de elevadores hidráulicos, sino también de sillas de dentista, gatos hidráulicos, entre otras tecnologías.

### Manometría:

En la práctica la necesidad de conocer la presión, por ejemplo, de una llanta, de un balón de gas o en medicina, la presión arterial, y ocular ha hecho necesario el desarrollo de instrumentos que nos permitan determinar este valor. Definimos manometría a las técnicas y procedimientos que hacen posible lograr esto.

La presión absoluta se medirá con respecto al vacío perfecto, la presión manométrica, se mide con respecto a la presión atmosférica. Las presiones absolutas siempre son positivas, pero las manométricas pueden o no serlo.

Las unidades en el sistema internacional son los  $N/m^2$ , que se denomina Pascal, aunque existen aparatos en los que la presión se mide por  $lb/pulg^2$ , unidades que pertenecen al sistema IG.

Young & Freedman (2009) nos dicen lo siguiente sobre los medidores:

El medidor de presión más simple es el manómetro de tubo abierto, que posee un tubo en forma de U que contiene un líquido de densidad  $\rho$ , con frecuencia mercurio o agua; otro medidor de presión común es el barómetro de mercurio, que consiste en un largo tubo de vidrio, cerrado por un extremo, que se llena con mercurio y luego se invierte sobre un plato con mercurio. Este instrumento indica la presión atmosférica  $p_{atm}$  directamente por la altura de la columna de mercurio (p. 461).

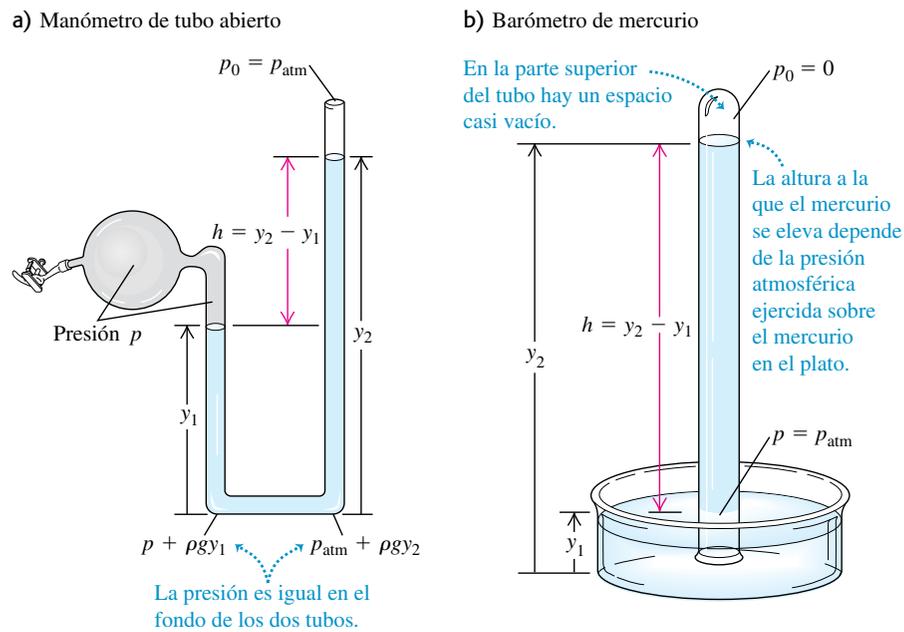


Figura 9. Instrumentos usados en la medición de la presión

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 461

- **Vasos comunicantes:** Es la asociación de varios recipientes o tubos conectados a través de los cuales fluye un líquido en su interior. Se usa para determinar el peso específico de líquidos desconocidos y cumplen el principio de Pascal.

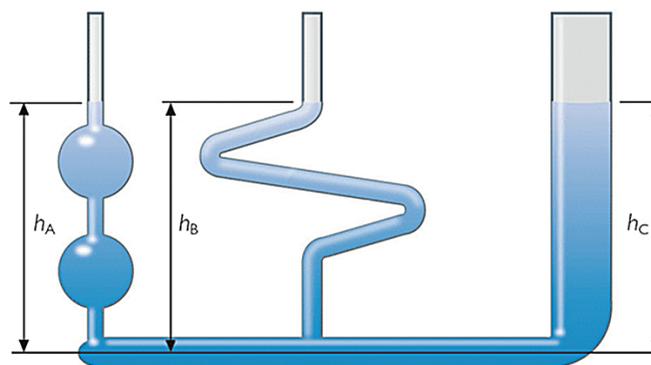


Figura 10. Vasos comunicantes

Fuente: Disponible en <http://bit.ly/2aryTgw>

La presión en los tres tubos a la misma altura es la misma:  $P_A = P_B = P_C$ .

### 3. FUERZA SOBRE SUPERFICIES SUMERGIDAS

Si imaginamos una superficie sumergida en un fluido, el fluido a cada lado de ella ejerce fuerzas iguales y opuestas sobre la superficie, y estas generan una presión que es normal y uniforme a su alrededor, por esto al analizar la presión que lo afecta consideramos solo el peso de la columna de líquido que esta sobre la partícula, que aumentará al aumentar la profundidad, y a la que denominamos presión hidrostática.

Nótese que solo hablamos de la fuerza ejercida por el líquido, que es la que genera esta presión.

### 4. PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Cuando sumergimos un cuerpo en una piscina llena de agua, esta genera presiones en la superficie del cuerpo sumergido, que se incrementan a mayor profundidad. Esta fuerza hacia arriba es lo que denominamos empuje.

La anécdota más conocida sobre Arquímedes, matemático griego, cuenta cómo inventó un método para determinar el volumen de un objeto con una forma irregular. De acuerdo a Vitruvio, arquitecto de la antigua Roma, una nueva corona con forma de corona triunfal había sido fabricada para Hieron II, tirano gobernador de Siracusa, el cual le pidió a Arquímedes determinar si la corona estaba hecha de oro sólido o si un orfebre deshonesto le había agregado plata. Arquímedes tenía que resolver el problema sin dañar la corona, así que no podía fundirla y convertirla en un cuerpo regular para calcular su densidad.

Mientras tomaba un baño, notó que el nivel de agua subía en la tina cuando entraba, y así se dio cuenta de que ese efecto podría usarse para determinar el volumen de la corona. Debido a que la compresión del agua sería despreciable, la corona, al ser sumergida, desplazaría una cantidad de agua igual a su propio volumen. Al dividir la masa de la corona por el volumen de agua desplazada, se podría obtener la densidad de la corona. La densidad de la corona sería menor si otros metales más baratos y menos densos le hubieran sido añadidos. Entonces, Arquímedes salió corriendo desnudo por las calles, tan emocionado estaba por su descubrimiento para recordar vestirse, gritando "eureka" (en griego antiguo: "εὕρηκα" que significa "¡Lo he encontrado!"). (<http://fisicameca.jimdo.com/inicio/principio-de-arquimedes/historia-del-principio-de-arquimedes/>, s.f.)

Esta es la historia que da origen al principio que dice lo siguiente: "Si un cuerpo está parcialmente sumergido en un fluido, este hará una fuerza hacia arriba igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo". Por ello, podemos decir que un cuerpo flotará si es menos denso que el fluido en que se encuentra.

### 5. HIDRODINÁMICA

También conocida como "dinámica de fluidos", es la parte de la física que estudia los fluidos en movimiento y las leyes y principios que los gobiernan:

#### 5.1. Flujo de fluidos:

Denominamos así al desplazamiento de un fluido, un fluido es considerado ideal cuando es incompresible y no tiene fricción interna.

El flujo puede ser de los siguientes tipos:

- Estable cuando el patrón del flujo no cambia en el tiempo.
- Laminar: es un flujo estable, que se desliza en capas ordenadas unas sobre otras.
- Turbulento: No tiene un patrón de desplazamiento, cambia constantemente.

Otros conceptos importantes que debemos conocer son:

- Línea de flujo: Es el trayecto de una partícula de flujo en movimiento.
- Línea de corriente: Es la curva de la tangente que tiene la dirección de la velocidad en ese punto.

## 5.2. Ecuación de continuidad:

Se basa principalmente en que la masa de un fluido no varía al desplazarse, pero su velocidad sí puede variar en el trayecto. Para esto se realiza el siguiente análisis:

Considere una porción de un tubo de flujo entre dos secciones transversales estacionarias con áreas  $A_1$  y  $A_2$ . Los valores de la rapidez del fluido en estas secciones son  $v_1$  y  $v_2$ , respectivamente. Durante un breve intervalo de tiempo  $dt$ , el fluido en  $A_1$  se mueve una distancia  $v_1 dt$ , así que un cilindro de fluido de altura  $v_1 dt$  y volumen  $dV_1 = A_1 v_1 dt$  fluye hacia el tubo a través de  $A_1$ . Durante ese mismo lapso, un cilindro de volumen  $dV_2 = A_2 v_2 dt$  sale del tubo a través de  $A_2$ . Consideremos primero el caso de un fluido incompresible cuya densidad  $\rho$  tiene el mismo valor en todos los puntos. La masa  $dm_1$  que fluye al tubo por  $A_1$  en el tiempo  $dt$  es  $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$ . De manera similar, la masa  $dm_2$  que sale por  $A_2$  en el mismo tiempo es  $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$ . En flujo estable, la masa total en el tubo es constante, así que  $dm_1 = dm_2$  y

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \text{ (ecuación de continuidad, fluido incompresible)}$$

El producto  $Av$  es la *tasa de flujo de volumen*  $dV/dt$ , la rapidez con que el volumen cruza una sección del tubo:

$$dV/dt \text{ (tasa de flujo de volumen)}$$

La tasa de flujo de *masa* es el flujo de masa por unidad de tiempo a través de una sección transversal, y es igual a la densidad  $\rho$  multiplicada por la tasa de flujo de volumen  $dV/dt$  (Young & Freedman, 2009, pág. 467).

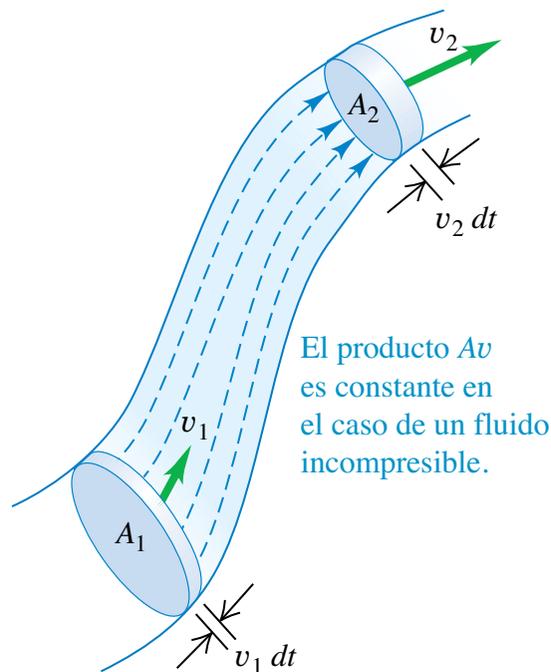


Figura 11. Representación de continuidad.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 467.

### 5.3. Teorema de Bernoulli:

Relaciona la presión, la rapidez y la altura del flujo de un fluido ideal. Se usa para analizar plantas hidroeléctricas, sistemas de plomería y desplazamiento de aviones.

El teorema tiene como base la ecuación de continuidad que incorpora la variable presión en el desplazamiento del fluido. Se asume un fluido incompresible que se desplaza por un tubo de sección transversal variable, entonces se genera una variación de velocidad, eso significa que existe una aceleración. La fuerza que la causa se aplicará al fluido circundante, que significa que la presión varía en algunos tramos.

Cuando la sección transversal se estrecha, el fluido se acelera, lo que significa que se desplaza a una zona de menor presión, donde existe una fuerza neta hacia adelante que lo acelera. Si cambia la altura, también se origina presión adicional.

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (\text{ecuación de Bernoulli})$$

Donde  $p$ =presión,  $\rho$ =densidad del fluido,  $g$ =gravedad,  $v_1$ =velocidad 1,  $y_1$ =altura inicial,  $y_2$ =altura final,  $v_2$  velocidad final.

Este principio solo se aplica en los casos en los que el fluido es incompresible, el flujo estable y sin fricción.



#### LECTURA SELECCIONADA N° 1: LA MEDICIÓN DEL TIEMPO

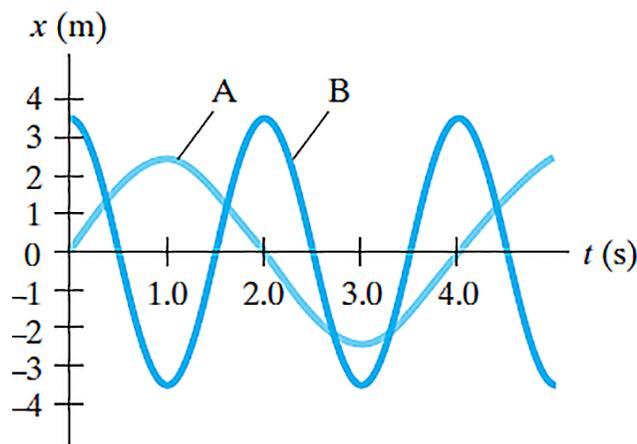
Morrone, J. (2008). La medición del tiempo. *Revista Ingenierías*, 11 (41), 14-23. Disponible en: <http://bit.ly/29rqB6D>



## ACTIVIDAD FORMATIVA N° 1

Resuelva los siguientes ejercicios y problemas a fin de poner en práctica los conceptos aprendidos:

1. Si una partícula experimenta un m.a.s. con amplitud de 0.18 m, ¿cuál será la distancia total que la partícula viaja en un periodo?
2. Los resortes de un automóvil de 1500 kg se comprimen 5.0 mm cuando una persona de 68 kg se sienta en el lugar del conductor. Si el automóvil pasa por un tope, ¿cuál será la frecuencia de las vibraciones? Ignore el amortiguamiento.
3. Estime la rigidez del resorte en el cangurín de un niño, si éste tiene una masa de 35 kg y rebota una vez cada 2.0 segundos.
4. La figura muestra dos ejemplos de m.a.s., designados como A y B. Para cada uno, diga cuál es a) la amplitud, b) la frecuencia y c) el periodo. d) Escriba las ecuaciones para A y B en la forma de seno o coseno.



5. Imagine que compra una pieza rectangular de metal de 5.0 X15.0 X 30.0 mm y masa de 0.0158 kg. El vendedor le dice que es de oro. Para verificarlo, usted calcula la densidad media de la pieza. ¿Qué valor obtiene? ¿Fue una estafa?
6. Una esfera uniforme de plomo y una de aluminio tienen la misma masa. ¿Cuál es la razón entre el radio de la esfera de aluminio y el de la esfera de plomo?
7. ¿Qué presión manométrica debe producir una bomba para subir agua del fondo del Gran Cañón (elevación 730 m) a Indian Gardens (elevación 1370 m)? Exprese sus resultados en pascales y en atmósferas.
8. Un cortocircuito deja sin electricidad a un submarino que está 30 m bajo la superficie del mar. Para escapar, la tripulación debe empujar hacia fuera una escotilla en el fondo que tiene un área de 0.75 m<sup>2</sup>.

## TEMA N° 3: ONDAS MECÁNICAS

Los vemos y experimentamos a diario al tocar una guitarra en la vibración de las cuerdas, en las olas del mar, al lanzar piedras en el agua, en las ondas sonoras que nos permiten oír, en los terremotos. Todos estos fenómenos tienen algo en común y son las ondas mecánicas, aquellas ondas que se propagan a través de un medio material.

En esta unidad conoceremos un poco más de ellas.

Para empezar, recordemos que una onda es una perturbación que se propaga por un medio a través del espacio y que al trasladarse transporta energía. Las ondas pueden ser de las siguientes clases:

- **Mecánicas:** cuando se propagan por un medio físico, sea líquido, sólido o gaseoso.
- **Electromagnéticas:** Que son aquellas que se propagan sin necesidad de un medio, por lo tanto, lo pueden hacer en el vacío.
- **Gravitacionales:** Que son las perturbaciones que cambian la geometría espacio-tiempo.

En esta unidad, hablaremos específicamente de las ondas mecánicas, que tienen varias clasificaciones.

### 1. TIPOS DE ONDAS MECÁNICAS

**Las ondas mecánicas se pueden clasificar de las siguientes maneras:**

#### 1.1. EN FUNCIÓN DE SU PROPAGACIÓN

- 1.1.1. Ondas unidimensionales:** Son aquellas que se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio, por ejemplo: ondas en los muelles, en las cuerdas.
- 1.1.2. Ondas Bidimensionales:** Son ondas que se propagan en dos direcciones; suelen denominarse también ondas superficiales.
- 1.1.3. Ondas tridimensionales o esféricas:** Se propagan en tres direcciones, porque salen de la fuente de perturbación en todas direcciones; ejemplo de esta onda es la onda sonora.

#### 1.2. EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE SU PROPAGACIÓN

- 1.2.1. Onda longitudinal o de compresión:** Son aquellas en que la dirección de la vibración es paralela a la dirección de la propagación, por ejemplo, las ondas sonoras.
- 1.2.2. Onda transversal:** Es toda aquella onda en la que la dirección de la vibración es perpendicular a la dirección de la propagación.
- 1.2.3. Ondas periódicas:** Hablamos de ondas periódicas cuando cada partícula de la cuerda tiene un movimiento periódico. La mayoría de movimientos en la naturaleza, como hemos comentado anteriormente, son periódicos.

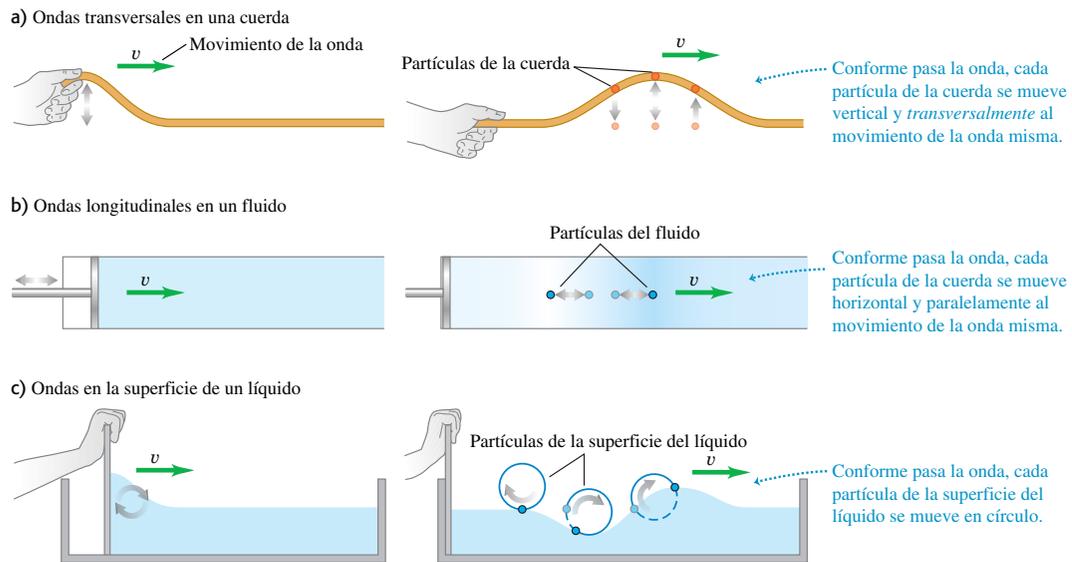


Figura 12. Tipos de onda.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 488.

## 2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE UNA ONDA Y RAPIDEZ DE UNA ONDA TRANSVERSAL

En las ondas se reconocen las siguientes características:

- Periodo (T):** Tiempo que demora una onda en terminar un ciclo completo.
- Frecuencia (f):** Número de ciclos por segundo ( $1/T$ ).
- Amplitud (A):** La máxima perturbación en un ciclo de vibración.
- Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Distancia a lo largo de la perturbación entre dos puntos equivalentes.

Por ejemplo:

$$2 \text{ crestas: } \lambda = v/f$$

Las ondas periódicas pueden describirse en función de las características arriba mencionadas, pero para definir posiciones más exactas se necesita definir la función de la onda, en este caso de las ondas periódicas, específicamente las sinusoidales, que son motivo de nuestro estudio, y cuyas partículas obedecen al m.a.s. que hemos visto anteriormente.

Para nuestro estudio se asumirá que tenemos una onda sinusoidal que viaja de izquierda a derecha, y que las partículas de la cuerda oscilan con m.a.s., pero en puntos distintos no están coordinadas, lo que origina que haya partículas que viajen desfasadas de otras, es decir, tienen distinta fase.

Así, para una partícula de la cuerda ubicada en el lado izquierdo en  $t=0$ , usando la demostración de Sears y Zemanky, tenemos:

$$y(x = 0, t) = A \cos \omega t = A \cos 2\pi f t$$

Es decir, la partícula oscila en movimiento armónico simple con amplitud  $A$ , frecuencia  $f$  y frecuencia angular  $\omega=2\pi f$ . La notación  $y(x=0, t)$  nos recuerda que el movimiento de esta partícula es un caso especial de la función de onda  $y(x, t)$  que describe toda la onda. En  $t = 0$ , la partícula en  $x = 0$  tiene máximo desplazamiento positivo ( $y = A$ ) y está instantáneamente en reposo (porque el valor de  $y$  es un máximo). La perturbación ondulatoria viaja de  $x = 0$  a algún punto  $x$  a la derecha del origen en un tiempo dado por  $x/v$ , donde  $v$  es la rapidez de la onda. Así, el movimiento del punto  $x$  en el instante  $t$  es el mismo que el movimiento del punto  $x=0$  en el instante anterior  $t - x/v$ . Por lo tanto, podemos obtener el desplazamiento del punto  $x$  en el instante  $t$  con solo sustituir  $t$  en la ecuación por  $(t - x/v)$ . Al hacerlo, obtenemos la siguiente expresión para la función de onda:

$$y(x, t) = A \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

Dado que  $\cos(-\theta) = \cos\theta$ , podemos describir la función de onda así:

$$y(x, t) = A \cos \left[ \omega \left( \frac{x}{v} - t \right) \right] = A \cos 2\pi f \left( \frac{x}{v} - t \right) \quad \text{(onda senoidal que avanza en la dirección } +x \text{)}$$

El desplazamiento  $y(x, t)$  es función tanto de la posición  $x$  del punto como del tiempo  $t$ . Podemos hacer más general la ecuación contemplando diferentes valores del ángulo de fase, pero por ahora omitiremos esto.

Podemos describir la función de onda dada por la ecuación de varias formas distintas, pero útiles. Una es expresarla en términos del periodo  $T = 1/f$  y la longitud de onda  $\lambda = v/f$ :

$$y(x, t) = A \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad \text{(onda senoidal que se mueve en la dirección } +x \text{)}$$

Obtenemos otra forma útil de la función de onda, si definimos una cantidad  $k$  llamada **número de onda**:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{(número de onda)}$$

Sustituyendo  $y$  en la relación longitud de onda  $\lambda=2\pi/k$  y frecuencia  $f= \omega/2\pi$ , obtenemos lo siguiente:

$$\omega = vk \quad \text{(onda periódica)}$$

Ahora podemos describir la ecuación como:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad \text{(onda senoidal que se mueve en la dirección } +x \text{)}$$

### Rapidez de una onda transversal

En una cuerda u alambre tenso, está dada por:

$$V = \sqrt{T/u}$$

Siendo  $T$ , la tensión, y  $u$ : masa por unidad de longitud.

Esta expresión nos demuestra que la rapidez de la onda se incrementara al incrementar la tensión de la cuerda.

### 3. ENERGÍA DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

Al iniciar la unidad comentamos que las ondas transportan energía de una región a otra; prueba de ello son las olas, así como las ondas sísmicas que originan destrucción, lo cual sucede porque al propagarse cada parte del medio hace una fuerza y realiza un trabajo que se transforma en energía.

Así analicemos un punto "a" de la cuerda, que se desplaza en dirección del eje y, entonces  $F_y$  realiza un trabajo sobre este punto transfiriendo energía, la potencia en este punto sería la fuerza transversal en este punto multiplicada por la velocidad transversal en el mismo.

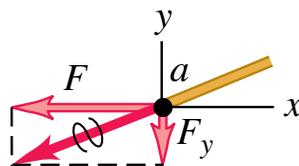


Figura 13. Componentes de la fuerza en el punto a.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 502

Para una onda sinusoidal de frecuencia  $f$ , las partículas se mueven en movimiento armónico simple conforme la onda pasa, y cada partícula tiene energía  $E = 1/2 kA^2$  donde  $A$  es el desplazamiento máximo (amplitud) de su movimiento, ya sea transversal o longitudinalmente. Al usar la ecuación podemos escribir  $K = \pi^2 m f^2$  donde  $m$  es la masa de una partícula (o pequeño volumen) del medio. Así, en términos de la frecuencia  $f$  y la amplitud  $A$ . (Giancoli, 2001)

$$E = \frac{1}{2} kA^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2$$

### 4. ONDAS ESTACIONARIAS

Al agitar una cuerda con un extremo fijo a la frecuencia adecuada esta viajará hasta el extremo fijo y se reflejará hasta el punto que dos ondas viajeras interfieran produciendo una onda estacionaria, que se denomina así por parecer que no está viajando. La cuerda parece tener segmentos que oscilan arriba y abajo en un patrón fijo.

Ciertos puntos de la onda permanecen inmóviles.

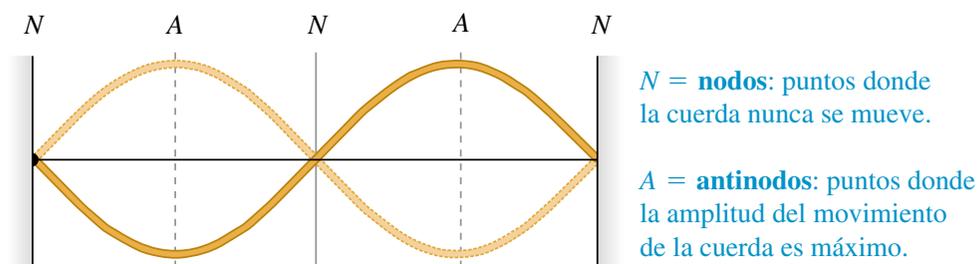


Figura 14. Ondas estacionarias.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 507.

En este grafico se observan nodos que son los puntos de interferencia destructiva (el punto no se mueve), y antinodos, los puntos de interferencia constructiva (donde la amplitud es máxima).

“Todos los puntos de la cuerda están en movimiento armónico simple, pero todos los que están entre cualquier par sucesivo de nodos oscilan *en fase*” (Young & Freedman, 2009, p. 509)

La expresión matemática de una onda estacionaria está dada por la siguiente ecuación:

$$y(x, t) = (A_{sw} \text{ sen } kx) \text{ sen } \omega t \quad (\text{onda estacionaria en una cuerda, extremo fijo en } x = 0)$$

En los puntos donde  $\text{sen } kx = 0$ , se ubicarán los nodos. Es bueno saber que la amplitud de la onda estacionaria es dos veces la amplitud de la onda viajera original, (Young & Freedman, 2009) y que a diferencia de la onda viajera, la onda estacionaria no pasa energía.

### Onda estacionaria: cuerda fija en ambos extremos:

Esta onda estacionaria es la que normalmente sucede en los instrumentos musicales como la guitarra. Al pulsar las cuerdas las ondas se desplazan de un extremo a otro, reflejándose una y otra vez, y formando ondas estacionarias. La onda que se origina en este caso es sonora, y la onda que resulta debe tener un nodo en cada extremo. La distancia entre nodos es media longitud de onda, por lo que la longitud de la cuerda estaría dada por  $n\lambda/2$ .

La frecuencia **más pequeña corresponde a** longitud de onda más grande y es llamada frecuencia fundamental ( $f = v/2L$ ). Las otras frecuencias pueden ser representadas por  $n(v/2L)$ .

El modo normal de un sistema oscilante es un movimiento en el que todas las partículas del sistema se mueven senoidalmente con la misma frecuencia. En los instrumentos de cuerda, las frecuencias de estos modos normales determinan los tonos musicales que producen estos instrumentos.

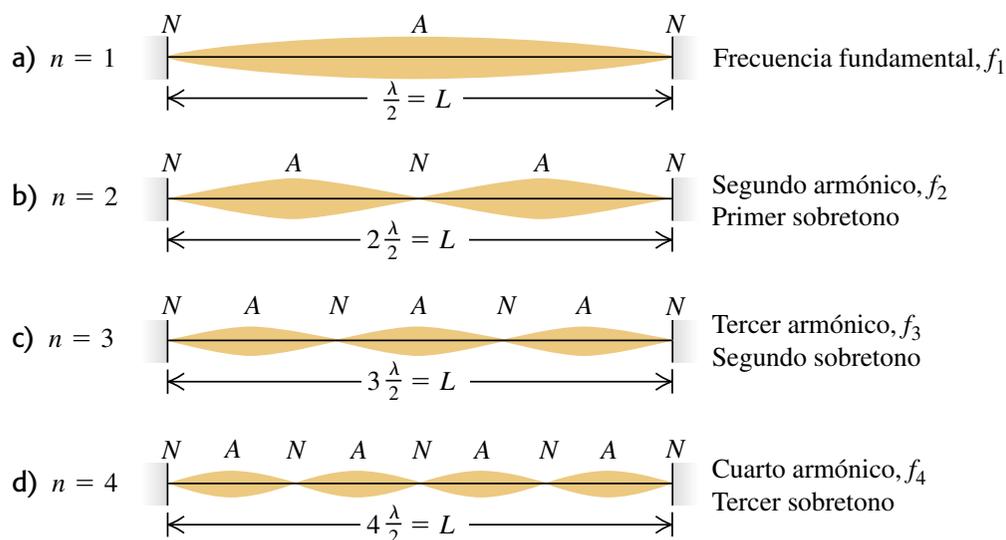


Figura 15. Modos normales en una cuerda fija.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 512.

La frecuencia fundamental de la onda sonora en el aire al vibrar en una cuerda de extremos fijos está dada por lo siguiente:

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (\text{cuerda fija en ambos extremos})$$

## 5. EL SONIDO Y EL OÍDO

El cantar de un ave, el sonido de un violín y el sonido de un tren al acercarse no son más que ejemplos de ondas longitudinales que viajan generalmente por el aire. Estas ondas son conocidas como ondas sonoras y nos permiten conocer nuestro entorno. Hasta ahora habían sido definidas en función al desplazamiento, pero son más que eso, son fluctuaciones de presión que el oído percibe; el oído humano es sensible a ondas en el rango de 20 a 20000Hz.

### 5.1. Ondas sonoras:

Como hemos dicho es una onda longitudinal que viaja en un medio, en esta parte tomaremos al aire como tal, el cual se dispersa en todas las direcciones. A diario vemos que estas ondas viajan también a través de medios **sólidos** (música alta que puso el vecino), y **líquidos** (delfines comunicándose). Las más sencillas de estudiar son las sinusoidales, que son expresadas matemáticamente:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad \text{(onda sonora que se propaga en la dirección } +x \text{)}$$

En una onda sonora, la variación de la presión fluctúa por arriba y debajo de la presión atmosférica, con la misma frecuencia como lo hace en el aire. Estas fluctuaciones son captadas por el canal auditivo en el que se encuentra el tímpano; los movimientos de la membrana timpánica se transmiten al oído medio hasta la cóclea, en donde el movimiento es convertido en impulso nervioso y el cerebro lo interpreta generando la imagen sonora.

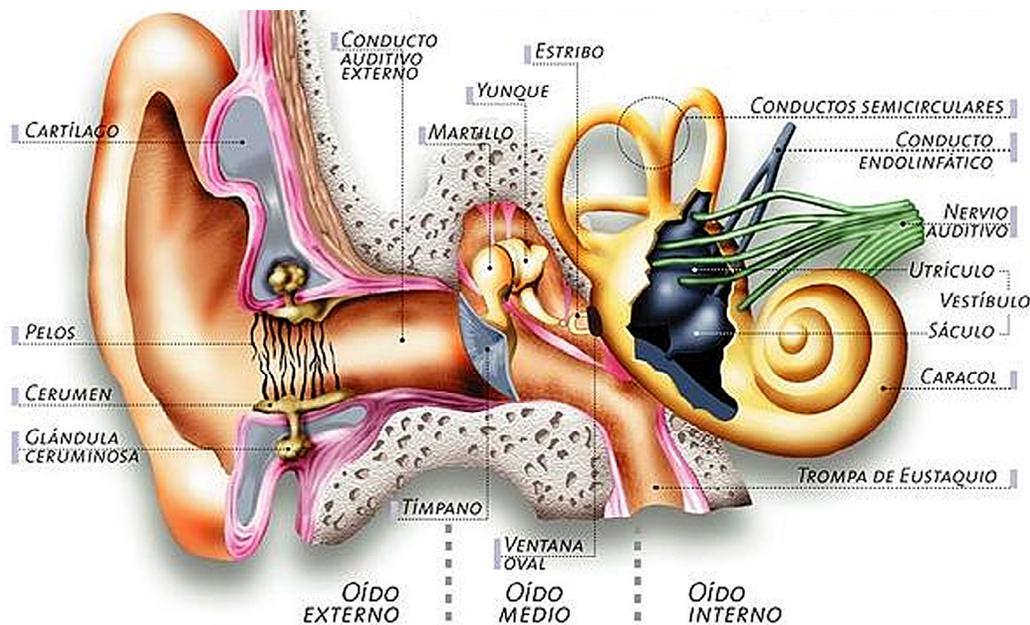


Figura 16. Oído humano.

Fuente: [oscrove.files.wordpress.com/2008/03/oc3addo-humano.jpeg](http://oscrove.files.wordpress.com/2008/03/oc3addo-humano.jpeg)

La fluctuación de presión en función de x y del tiempo está dada por lo siguiente:

$$P(x,t) = BkA \sin(kx - \omega t)$$

Donde A=amplitud, B=modulo de volumen, W=frecuencia angular, t= tiempo, x=desplazamiento.

## 5.2. Percepción de una onda sonora:

La percepción del sonido de una onda depende de las características físicas de la misma, a mayor amplitud de presión, mayor intensidad o volumen percibido, las características del sujeto también influyen en su percepción. Hay personas que son más sensibles a una determinada frecuencia. La edad también ocasiona pérdida de sensibilidad en el oído; a 1000 Hz, la presión mínima perceptible es de  $3 \times 10^{-5}$ Pa; en cambio, a 200 Hz, la presión requerida para escuchar el mismo volumen es  $3 \times 10^{-4}$ Pa.

El tono de un sonido depende de la frecuencia de la onda sonora, determinando si es grave o agudo. Cuando comparamos 2 ondas sonoras con igual frecuencia, pero distinta amplitud de presión, la que tiene mayor amplitud se percibe más fuerte y grave.

## 5.3. Rapidez de una onda:

La velocidad con la que se desplaza una onda varía según el medio en el que se desplaza, así en un **medio líquido** la velocidad dependería del módulo del volumen del líquido. Su expresión quedaría:

$$V = \sqrt{B/\rho}, \text{ siendo } B, \text{ modulo del volumen, } \rho \text{ densidad}$$

En un **medio sólido**, la onda adquiere mayor velocidad por la cercanía de sus moléculas, y la obtenemos de la siguiente manera:

$$V = \sqrt{\gamma/\rho}, \text{ siendo } \gamma \text{ módulo de Young, } \rho \text{ densidad}$$

A mayor densidad menor velocidad.

En un **medio gaseoso**, la velocidad es menor que en los otros medios debido a la distancia entre partículas, pero su velocidad estaría definida por la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\gamma RT / M}$$

En este caso, ya también depende de la temperatura (T), M, masa molar, R constante de los gases ( $8.314472 \text{ 15 2 J/mol} \cdot \text{K}$ ) e  $\gamma$  su módulo de volumen.

Para cada sustancia  $\gamma$ , B y M son constantes.

 TEMA N° 4:  
TERMODINÁMICA:

La termodinámica es la ciencia que estudia los procesos de transferencia de calor, cómo pueden ser aprovechados, y producir trabajo. Las leyes que la sustentan han permitido la creación de plantas de energía térmica que generan electricidad, generadores de vapor, calderos, motores de combustión, refrigeradoras, etc.

## 1. TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO

Son conceptos básicos para entender lo que es termodinámica y esta sección los recordaremos.

### 1.1. Temperatura:

Algunas veces todos la hemos relacionado a cuánto calor tenemos o qué tanto frío hace. La definición física es difícil, aunque Francisco Ramos define temperatura como “propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con su entorno” (Ramos, 2010). Otros autores no dan una definición exacta, pero señalan que está relacionada a la transferencia de calor. El hombre ideó instrumentos que permiten dar una idea de la cantidad de calor en un cuerpo, así nacen los termómetros como instrumentos para medir la calidez o frialdad. Por ejemplo, en el termómetro de mercurio la cantidad mínima de este material se dilata y sube por una escala ante la cercanía de un cuerpo caliente; pasados unos minutos ya no existe más transferencia de calor, y podemos tener una idea de la temperatura del cuerpo.

### 1.2. Equilibrio térmico:

Dados dos materiales, uno caliente y otro frío, se dirá que estos alcanzan el equilibrio térmico cuando al juntarlos, y se haya dado la transferencia de calor, esta ya no se dé. Es decir, ya no exista intercambio de calor y el sistema no varíe.

Un ejemplo de esto es cuando en un lugar muy frío cogemos una taza caliente en nuestras manos esperando que se nos calienten, y llega un punto en que ya no hay intercambio de calor.

Pero existen materiales llamados aislantes que no permiten la transferencia de calor; el aislante ideal no permite la interacción entre dos sistemas, evitando que alcancen el equilibrio térmico.

Una propiedad del equilibrio térmico es la llamada “la ley cero” que es una de las bases de la termodinámica y establece que dados 3 materiales A, B y C:

Si inicialmente C está en equilibrio térmico con A y con B, entonces A y B también están en equilibrio térmico entre sí” (Young & Freedman, 2009, p. 527).

Cuando se da la transferencia de calor por diferencia de temperatura, esta también es una transferencia de energía llamada calor. La unidad definida para cantidad de calor en relación a la temperatura se llama caloría y se define como “la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 °C a 15.5 °C” (Young & Freedman, 2009). Ya que el calor es energía, hay una relación definida entre estas unidades y las de energía mecánica que conocemos como el joule. Experimentos similares en relación al concepto de Joule han demostrado que:

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

Si deseáramos saber la cantidad de calor que necesita un material para variar su temperatura, es necesario conocer la cantidad de masa, la temperatura final e inicial, y lo que llamamos calor específico ( $c$ ) del material que es una característica de cada uno, así:

$$Q=mc\Delta T$$

### 1.3. Escalas de temperatura:

Para la determinación de temperaturas se crearon varias escalas, las **más conocidas son** las siguientes: Celsius, Fahrenheit, y Kelvin. Estas escalas están relacionadas y tiene equivalencia entre sí, pudiendo pasar una medida de un sistema a otro.

De grados centígrados a Fahrenheit:  $C_f = 9/5T_c + 32$

De grados centígrados a Kelvin:  $C_k = T_c + 273.15$

## 2. CALORIMETRÍA Y CAMBIOS DE FASE

La calorimetría está definida como la medición de calor. El calor provoca también cambios de fase como la fusión del hielo o la ebullición del agua. Para entender mejor, definiremos fase como un estado específico de la materia, que puede ser sólido, líquido o gaseoso. Cuando se pasa de un estado a otro, hablaremos de cambio de fase. Para una presión determinada, el cambio de fase se da en una temperatura definida, acompañada de absorción o liberación de calor, y de un cambio en el volumen y densidad.

Al agregar calor al hielo lentamente lo que se logra no es elevar su temperatura, sino fundir el hielo, haciéndolo cambiar de fase. El calor requerido para lograr esto se denomina calor de fusión, denotado como  $L_f$  y varía con el material, así para el agua a presión atmosférica normal la ecuación es la siguiente:

$$L_f = 3,34 \times 10^5 \text{ J}$$

Para fundir una masa  $m$  de material con  $L_f$  de calor de fusión, necesitaremos  $Q$  cantidad de calor que estará dada por lo siguiente:

$$Q = mL_f$$

Este proceso es reversible, ya que para congelarlo debemos quitar la misma cantidad de calor, ahora será negativa.

Cuando hacemos hervir agua y esta se evapora, hablamos de calor de vaporización  $L_v$ ; este proceso al igual que el anterior es reversible y se llama condensación.

Tabla 2  
Valores de  $L_v$  y  $L_f$  para diversos materiales

Sustancia	Punto de fusión normal		Calor de fusión, $L_f$ (J/kg)	Punto de ebullición normal		Calor de vaporización, $L_v$ (J/kg)
	K	°C		K	°C	
Helio	*	*	*	4.216	-268.93	$20.9 \times 10^3$
Hidrógeno	13.84	-259.31	$58.6 \times 10^3$	20.26	-252.89	$452 \times 10^3$
Nitrógeno	63.18	-209.97	$25.5 \times 10^3$	77.34	-195.8	$201 \times 10^3$
Oxígeno	54.36	-218.79	$13.8 \times 10^3$	90.18	-183.0	$213 \times 10^3$
Etanol	159	-114	$104.2 \times 10^3$	351	78	$854 \times 10^3$
Mercurio	234	-39	$11.8 \times 10^3$	630	357	$272 \times 10^3$
Agua	273.15	0.00	$334 \times 10^3$	373.15	100.00	$2256 \times 10^3$
Azufre	392	119	$38.1 \times 10^3$	717.75	444.60	$326 \times 10^3$
Plomo	600.5	327.3	$24.5 \times 10^3$	2023	1750	$871 \times 10^3$
Antimonio	903.65	630.50	$165 \times 10^3$	1713	1440	$561 \times 10^3$
Plata	1233.95	960.80	$88.3 \times 10^3$	2466	2193	$2336 \times 10^3$
Oro	1336.15	1063.00	$64.5 \times 10^3$	2933	2660	$1578 \times 10^3$
Cobre	1356	1083	$134 \times 10^3$	1460	1187	$5069 \times 10^3$

\*Se requiere una presión mayor que 25 atmósferas para solidificar el helio. A presión de 1 atmósfera, el helio sigue siendo líquido hasta el cero absoluto.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 587.

### 3. ENERGÍA INTERNA Y LA TRASFERENCIA DE CALOR

La energía interna de un sistema es la suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes **más la suma de todas las energías potenciales** de interacción entre ellas. Cabe mencionar que la energía interna no incluye la energía potencial debido a la interacción entre el sistema y su entorno.

Existen materiales que conducen el calor, llamados conductores y los que aísla el calor llamados aislantes, estos o promueven o evitan la transferencia de calor, pero existen tres mecanismos de transferencia de calor que veremos a continuación:

#### 3.1. Conducción:

El calor llega de un extremo a otro a través del material, por contacto, a nivel de los átomos; los de regiones más calientes tienen mayor energía cinética y empujan a los que no la tienen transfiriéndoles esta energía, que se traslada hasta el extremo del material.

En los metales algunos electrones suelen abandonar sus átomos originales y pueden llevar la energía de una región caliente a la más fría, por esta razón son buenos conductores de calor.

Solo hay transferencia de calor donde la diferencia de temperatura y el flujo de calor va del que tiene más alta a la de menos temperatura.

Llamamos corriente de calor ( $H$ ) a la tasa de flujo de calor por unidad de tiempo, y está definida por la siguiente ecuación:

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (\text{corriente de calor en conducción})$$

Donde:

K la constante de conductividad térmica, A, área transversal de la varilla,

-Th, temperatura mayor, Tc, temperatura menor, L, longitud de la varilla.

Su unidad en el S.I es el Watt.

La diferencia de temperaturas por unidad de longitud se denomina gradiente de temperatura.

### 3.2. Convección

Es la transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra. Pueden ser de dos tipos:

Convección forzada: si el fluido circula impulsado por una bomba o ventilador.

Convección natural o libre: si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por dilatación térmica.

Como ejemplos conocidos tenemos los sistemas de calefacción domésticos de aire caliente y de agua caliente, el sistema de enfriamiento de un motor de combustión y el flujo de sangre en el cuerpo.

### 3.3. Radiación

La **radiación** es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. La tasa de radiación depende de la naturaleza del área y se describe con una cantidad "e" que se llama de emisividad que representa la relación entre la tasa de radiación y la de área, es un número adimensional entre 0 y 1. Esta tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial A, y aumenta rápidamente con la temperatura, según la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin).

La emisividad también depende un poco de la temperatura. Así, la corriente de calor  $H = dQ/dt$  debida a radiación de un área superficial A con emisividad e a la temperatura absoluta T se puede expresar como:

$$H = Ae\sigma T^4 \quad (\text{corriente de calor en radiación})$$

Donde  $\sigma$  es la constante física fundamental llamada constante de Stefan-Boltzmann

## 4. PRIMERA LEY DE TERMODINÁMICA

Es la extensión de la ley de conservación de energía, para termodinámica y para entenderla debemos conocer que un sistema termodinámico es cualquier conjunto de objetos que forman una unidad y son capaces de intercambiar calor.

#### 4.1. Signos del calor y trabajo en termodinámica

Un proceso termodinámico es un intercambio de energía, que se transforma en calor, es decir agregamos calor al sistema, y el trabajo realizado por él. *El calor y el trabajo pueden tomar valores positivos, negativos, o nulo.*

Un valor positivo de  $Q$  representa flujo de calor *hacia* el sistema, con un suministro de energía correspondiente; un  $Q$  negativo representa flujo de calor hacia afuera del sistema. Un valor positivo de  $W$  representa trabajo realizado por el sistema contra el entorno, como el de un gas en expansión y, por lo tanto, corresponde a la energía que *sale* del sistema (Young & Freedman, 2009).

#### 4.2. Trabajo realizado al cambiar de volumen

Al expandirse un gas, un sólido o un fluido que se expande por presión, empuja las superficies de sus fronteras, las cuales se mueven hacia afuera; por lo tanto, siempre realiza trabajo positivo.

En un cambio finito de volumen de  $V_1$  a  $V_2$ :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV \text{ (trabajo efectuado en un cambio de volumen)}$$

La presión de un sistema puede variar con un cambio de volumen.

Si la presión es constante el trabajo efectuado en un cambio de volumen estará dado por el producto de la presión por el incremento de volumen.

#### 4.3. La primera ley de la termodinámica

La primera ley de termodinámica, establece que la cantidad de calor que se entrega o sustrae durante un proceso a un sistema es igual al trabajo realizado por o sobre el sistema, más el cambio de energía interna que experimenta la sustancia de trabajo. (Ramos, 2010, pág. 464).

$$\Delta U = U_f - U_o = Q - W$$

El cambio de energía interna de un sistema durante un proceso termodinámico no depende de la trayectoria sino de la energía inicial y final en el sistema.

### 5. PROCESOS TERMODINÁMICOS

---

#### 5.1. Proceso adiabático:

Es aquel proceso en el que la energía interna no sale ni entra en el sistema, la forma de lograrlo es aislando térmicamente el sistema.

En este proceso se cumple:  $\Delta U = -W$

#### 5.2. Proceso isocórico:

Es a volumen constante, la sustancia no realiza el trabajo, pero absorbe calor, lo que origina un incremento su energía interna.

$$\Delta U = Q$$

### 5.3. Proceso isobárico:

Se efectúa a presión constante. En general, ninguna de las tres cantidades:  $\Delta U$ ,  $Q$  y  $W$  es cero en un proceso isobárico, pero aun así es fácil calcular  $W$ .

$$\Delta U = Q - P(V_f - V_o)$$

### 5.4. Proceso isotérmico:

Es un proceso a temperatura constante, durante el cual todo el calor es transformado en trabajo.

$$Q = W = nRT \ln(V_f/V_o)$$

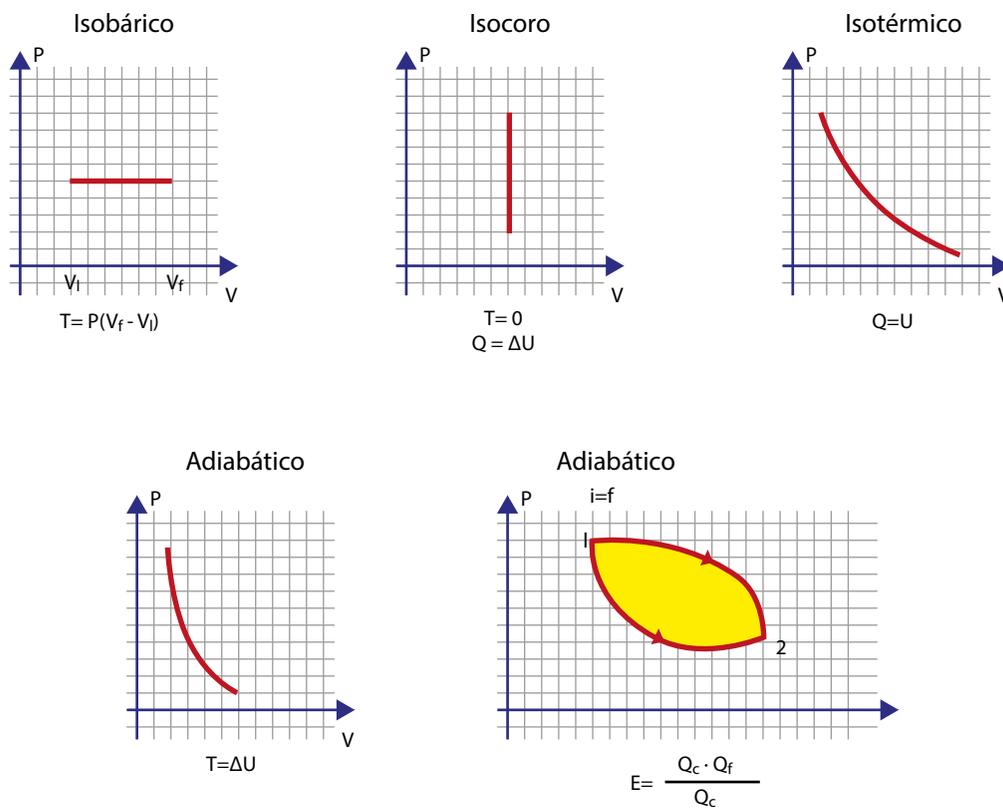


Figura 16. Procesos Termodinámicos  
Fuente: Disponible en <http://bit.ly/2ac6rwb>



## GLOSARIO DE LA UNIDAD I

---

### C

#### CRESTA

Punto que ocupa la posición más alta en una onda (Young & Freedman, 2009).

### O

#### OSCILACIÓN

Es un movimiento en el que la distancia del objeto al centro pasa por un máximo y un mínimo (Young & Freedman, 2009).

#### ONDA INFRA SÓNICA

Son ondas longitudinales con frecuencia de rango debajo de lo audible (Serway & Jewett, 2005).

#### ONDA ULTRASÓNICA

“Ondas longitudinales con frecuencias arriba del rango audible” (Serway & Faughn, 2001, p. 444).

### V

#### VALLE

Punto que ocupa la posición más baja en una onda (Young & Freedman, 2009).

#### VISCOSIDAD

Fricción interna en un fluido (Young & Freedman, 2009).



## BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD I

---

- Giancoli, D. (2001). *Física para ciencias e ingeniería*. México: Pearson Educación.
- Morones Ibarra, J. R. (2008). La medición del tiempo. *Ingenierías*, 11(41), 14-23.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2016). Capítulo 4. La presión atmosférica. En *Aprendiendo* [en línea]. Lima: SENAMHI. Recuperado de <http://www.senamhi.gob.pe/?p=1003>
- Serway, R. A. & Jewett, J. W. (2005). *Física para ciencias e ingeniería* (7ª ed., Vols. 1-2). México: Cengage Learnig. Volumen 1 disponible en: <http://www.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisIclver/FpCelS7EdV1.pdf> y volumen 2 en [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299010/Carpeta\\_AVA/Fisica\\_2.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299010/Carpeta_AVA/Fisica_2.pdf)
- Ramos, F. (2010). *Física: Teoría y práctica*. Lima: Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Young, H. & Freedman, R. (2009). *Física universitaria con física moderna* (12ª ed., Vols. 1-2). México: Pearson Educación. Volumen 1 disponible en <http://fis.ucv.cl/docs/Fis231/textos/Fisica-Universitaria-Sears-Zemansky-12va-Edicion-Vol1.pdf> y volumen 2 en [https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi\\_blog/r/Fisica\\_General\\_-\\_Fisica\\_Universitaria\\_Vol\\_2\\_ed\\_12\(Sears-Zemansky\).pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2_ed_12(Sears-Zemansky).pdf)



## AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD I

- Una cuerda de piano produce una nota la medio vibrando primordialmente a 220 Hz. Calcule su periodo y frecuencia angular.
  - $4.54 \times 10^{-3} \text{ s}$ .
  - $5.67 \times 10^{-3} \text{ s}$ .
  - $7 \times 10^{-3} \text{ s}$ .
  - $6.87 \times 10^{-3} \text{ s}$
- Un cuerpo de masa desconocida se une a un resorte ideal con constante de fuerza de 120 N/m. Se observa que vibra con una frecuencia de 6.00 Hz. Calcule el periodo del movimiento.
  - 0,876 s.
  - 0,167 s.
  - 1,45 s.
  - 0,3 s.
- El pistón de un elevador hidráulico para autos tiene 0.30 m de diámetro. ¿Qué presión manométrica, en pascales y en atm, se requiere para levantar un auto de 1200 kg?
  - $1,22 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $0,78 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $1,66 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $0,67 \times 10^5 \text{ Pa}$
- Una muestra de mineral pesa 1750 N en el aire, pero, si se cuelga de un hilo ligero y se sumerge por completo en agua, la tensión en el hilo es de 11.20 N. Calcule el volumen total.
  - $6,43 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
  - $4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
  - $2 \times 10^4 \text{ m}^3$
  - $0,78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
- La rapidez del sonido en aire a 20 °C es de 344 m/s. Calcule la longitud de onda de una onda sonora con frecuencia de 784 Hz, que corresponde a la nota sol de la quinta octava de un piano.
  - 0,439m
  - 3,57m
  - 0,23m
  - 1,5 m

6. ¿Qué departamento tiene mayor presión atmosférica?
- a) Lima
  - b) Cajamarca
  - c) Arequipa
  - d) Puno
7. Es el proceso termodinámico que se caracteriza por tener la presión constante.
- a) Adiabático
  - b) Isobárico
  - c) Isocoro
  - d) Isotérmico
8. Encuentre la rapidez del sonido a través del mercurio, que tiene un módulo volumétrico de  $2,8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  y una densidad  $13600 \text{ Kg/m}^3$ .
- a)  $1345 \text{ m/s}$
  - b)  $1230 \text{ m/s}$
  - c)  $1435 \text{ m/s}$
  - d)  $345 \text{ m/s}$
9. Calcula la masa de una esfera sólida de hierro que tiene un diámetro de  $3 \text{ cm}$ . ( $\rho_{\text{hierro}} = 7,86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ ).
- a)  $0,99 \text{ Kg}$
  - b)  $12 \text{ Kg}$
  - c)  $0,11 \text{ Kg}$
  - d)  $0,76 \text{ Kg}$
10. Una mujer de  $50 \text{ Kg}$  se equilibra sobre un par de zapatillas con tacón aguja. Si el tacón es circular y tiene un radio de  $0,5 \text{ cm}$ . ¿qué presión ejerce sobre el piso?
- a)  $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
  - b)  $4,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
  - c)  $6,24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
  - d)  $7,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$





# ELECTROSTÁTICA

 DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD II



## ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES

### Resultado de aprendizaje de la Unidad II:

Al finalizar la unidad el estudiante será capaz de resolver problemas de carga eléctrica, campo eléctrico, ley de Gauss, potencial eléctrico, capacitancia y dieléctricos empleando instrumentos, técnicas y fórmulas en un trabajo de laboratorio.

CONOCIMIENTOS	HABILIDADES	ACTITUDES
<p><b>Tema N.º 1: CARGA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Carga eléctrica</li> <li>2 Leyes de Coulomb</li> <li>3 Fuerza eléctrica y campo eléctrico para cargas puntuales</li> <li>4 Fuerza eléctrica y campo eléctrico para cargas distribuidas</li> <li>5 Dipolos eléctricos</li> </ol> <p><b>Tema N.º 2: LEY DE GAUSS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Carga y flujo eléctrico</li> <li>2 Cálculo del flujo eléctrico</li> <li>3 Ley de Gauss</li> <li>4 Aplicaciones de la ley de Gauss</li> <li>5 Cargas en conductores</li> </ol> <p><b>Tema N.º 3: POTENCIAL ELÉCTRICO</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Energía potencial eléctrica</li> <li>2 Potencial eléctrico</li> <li>3 Cálculo del potencial eléctrico en cargas puntuales</li> <li>4 Cálculo del potencial eléctrico en cargas distribuidas</li> <li>5 Superficies equipotenciales</li> </ol> <p><b>Tema N.º 4: CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Capacitores y capacitancia</li> <li>2 Asociación de capacitores</li> <li>3 Almacenamiento de energía</li> <li>4 Dieléctricos</li> <li>5 La ley de Gauss en los dieléctricos</li> </ol> <p><b>Autoevaluación de la Unidad II</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza instrumentos, técnicas y fórmulas para aplicar en la carga eléctrica, campo eléctrico, potencial eléctrico y capacitancia.</li> <li>• Resuelve ejercicios de carga eléctrica, campo eléctrico, potencial eléctrico y capacitancia.</li> <li>• Realiza experimentos en laboratorio.</li> <li>• Redacta correctamente los informes de laboratorio</li> </ul> <p><b>Actividad N.º 2</b> Los estudiantes resuelven ejercicios.</p> <p><b>Control de lectura N.º 2</b> Evaluación del tema n.º 1, 2, 3, 4 más los contenidos de las lecturas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma conciencia del rol de ser estudiante universitario, de la puntualidad y respeto en el desarrollo de las clases.</li> <li>• Demuestra interés en los nuevos conocimientos y respeta la opinión de sus compañeros.</li> <li>• Juzga la importancia del cálculo en su quehacer cotidiano y profesional.</li> <li>• Trabaja individual y grupalmente.</li> </ul>



# TEMA N.º 1: CARGA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO

¿Quién, cuando era niño, no ha frotado una regla con la idea de levantar pequeños papelitos?, o ¿quién no ha recibido una pequeña descarga al dar la mano a alguien en un lugar con clima seco? Estas son evidencias de que existen cargas eléctricas en nuestro entorno. Los descubrimientos de las leyes que rigen en el campo eléctrico han permitido que ahora podamos tener luz en nuestras casas. En esta unidad, repasaremos algunos conceptos básicos de este interesante tema.

## 1. CARGA ELÉCTRICA

Hace mucho tiempo, se descubrió que la materia estaba formada por moléculas y estas a su vez por átomos que están constituidos por electrones, protones y neutrones. Cuando el átomo pierde o gana un electrón o protón hablamos de ionización. Si en la suma de todos los átomos del sistema el número de electrones es igual al de protones, decimos que estamos frente a un cuerpo neutro; si el número de electrones es mayor, se dice que tiene carga negativa; y si tiene un mayor número de protones, tendrá carga positiva.

Cuando se habla de carga de un cuerpo se refiere a la carga neta.

Los principios que gobiernan las cargas se pueden resumir de la siguiente manera:

- La suma algebraica de las cargas en un sistema cerrado es constante (principio de conservación de carga).
- La magnitud de la carga del electrón o protón es la carga natural, que es igual a la fórmula que se presenta a continuación:

$$|e| = 1.60219 \times 10^{-19} \text{C.}$$

- Las cargas iguales se repelen y las contrarias se atraen.

La facilidad con que se desplazan los electrones en los materiales de la naturaleza ha permitido clasificar estos en tres tipos: aisladores, conductores y semiconductores. En primer lugar, cuando el desplazamiento de los electrones es difícil a través del material serán aisladores. Dicha característica es aprovechada para lograr, por ejemplo, aislantes de corriente como el caucho. En segundo lugar, cuando los electrones se mueven con bastante libertad a través del material serán conductores. Por ejemplo, el cobre y el aluminio tienen esta propiedad. Por último, existe también una tercera clase de material que posee las características de los anteriores y se les conoce como materiales semiconductores. A estos se les puede añadir cantidades controladas de átomos para modificar su naturaleza como es el caso del silicio, un material muy usado en dispositivos electrónicos.

Por otro lado, es necesario conocer que existen varias formas de cargar un material, una de ellas es a través del proceso llamado carga por inducción, el cual permite trasladar electrones excedentes de un objeto a otro sin contacto entre ellos. Un ejemplo de esto es una esfera conductora aislada de tierra a la que acercamos una barra de caucho cargada negativamente, la región de la esfera cercana a la barra tendrá exceso de carga positiva, mientras que la lejana, exceso de carga negativa. Nótese que el ejemplo habla de una barra de caucho, es decir, un aislante. Esto sucede porque los aislantes también pueden ser cargados, en este caso solo se carga la zona inducida.

## 2. LEY DE COULOMB

Es la ley fundamental de la fuerza eléctrica estacionaria entre dos partículas cargadas y señala que existe una fuerza entre las dos partículas con carga  $q_1$  y  $q_2$  respectivamente separadas por una distancia  $r$ , la que es inversamente proporcional a la distancia entre ellas, pero directamente proporcional al producto de sus cargas. Esta fuerza será atractiva si las cargas son de signo opuesto y repulsiva si son iguales.

$F = K q_1 q_2 / r^2$ , en forma vectorial sería  $F = K q_1 q_2 / r^2 \cdot \check{r}$ , siendo  $\check{r}$  el vector unitario dirigido.

$K$  es la constante de Coulomb que en unidades del S.I. equivale a  $8,9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  y puede ser representada como se aprecia a continuación:

$$K = 1/4\pi\epsilon_0$$

Siendo  $\epsilon_0$  la constante de permitividad del espacio libre que equivale a lo siguiente:

$$\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$$

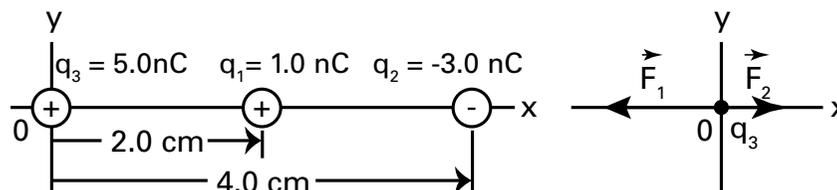
## 3. FUERZA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO PARA CARGAS PUNTUALES

### 3.1. Principio de superposición de fuerzas:

Este es un principio muy importante, ya que nos permite saber qué hacer cuando son más de dos cargas las que afectan a una tercera en forma simultánea. La ley de Coulomb establece específicamente la fuerza entre dos cargas puntuales, pero cuando es mayor la cantidad de cargas que afecta una tercera, se considerará que la fuerza ejercida resultante será la suma de las fuerzas ejercidas por cada carga sobre esta tercera.

#### Ejemplo:

Dos cargas puntuales se localizan en el eje  $+x$  de un sistema de coordenadas. La carga  $q_1 = 1.0 \text{ nC}$  está a  $2.0 \text{ cm}$  del origen, y la carga  $q_2 = -3.0 \text{ nC}$  está a  $4.0 \text{ cm}$  del origen. ¿Cuál es la fuerza total que ejercen estas dos cargas sobre una carga  $q_3 = 5.0 \text{ nC}$  que se encuentra en el origen? Las fuerzas gravitatorias son despreciables. (Young & Freedman, 2009, p. 720).



Primero hacemos el gráfico del problema e identificamos los datos principales como las cargas y su ubicación en el plano; luego, determinamos la fuerza generada por cada carga sobre la que se encuentra en origen:

La fuerza generada por la carga 1:

$$F_1 = K(1 \times 10^{-9} \text{ C})(5 \times 10^{-9}) / (0,02 \text{ m})^2 = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 (5 \times 10^{-18}) / (0,02 \text{ m})^2 = 1,125 \times 10^{-4} \text{ N}$$

$$F_2 = K(3 \times 10^{-9})(5 \times 10^{-9}) / (0,04 \text{ m})^2 = 8,43 \times 10^{-5} \text{ N}$$

En el gráfico de la izquierda, observamos la dirección de las fuerzas 1 y 2, la  $f_1$  es negativa porque  $q_1$  es repelida por la  $q_3$ , en cambio  $f_2$  será positiva porque está siendo atraída, de modo que la fuerza resultante será la siguiente:

$$- 1,125 \times 10^{-4} \text{N} + 8,43 \times 10^{-5} \text{N} = -2,82 \times 10^{-5} \text{N}$$

### 3.2. Campo eléctrico:

En forma simplificada podemos definirlo como la fuerza eléctrica por unidad de carga, que una carga experimenta en un determinado punto.

$$E = F_o/q_o$$

Su Unidad en el S.I. es N/C. Reemplazando F, tenemos lo siguiente:

$$E = Kq_o/q_o r^2 \cdot \vec{r} \quad \text{Entonces: } E = Kq/r^2 \cdot \vec{r}$$

Es conveniente explicar que esta fuerza es la que experimenta una carga de prueba en un determinado punto dividida por esta carga, donde r será la distancia de la carga externa al punto donde se encuentra la carga de prueba.

En consecuencia, el campo eléctrico producido se debe a alguna carga externa a la carga de prueba. Para el desarrollo de los ejercicios se asume que dicha carga se encuentra en reposo y tiene un valor tan pequeño que no afecta la distribución de la carga responsable del campo eléctrico.

Si aplicamos el principio de superposición al campo eléctrico tendríamos que para un grupo de cargas el campo eléctrico estaría definido de la siguiente manera:

$$E = K \sum q/r^2 \cdot \vec{r}$$

## 4. FUERZA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO PARA CARGAS DISTRIBUIDAS

Hasta ahora hemos tratado solo el caso de fuerza y campo en cargas puntuales, considerando que la carga que origina el campo es pequeña, pero si esta fuera más grande la distribución de cargas variaría. En ese caso, mientras más pequeña sea  $q_o$ , más probable es que no se afecte; teniendo en cuenta esta consideración el campo se puede representar así:

$$\vec{E} = \lim_{q_o \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_o}{q_o}$$

Para cálculos prácticos se considerará la distribución fija del campo.

En la realidad la carga se encuentra distribuida en el espacio o en sus superficies, y es importante conocer su comportamiento para predecirlo y aprovecharlo como en los dispositivos electrónicos semiconductores.

Para lograr determinar el campo eléctrico en estos casos consideramos que está formado por muchas cargas puntuales, cada una de ellas produce a su vez un campo eléctrico; por tanto, la carga de prueba  $q_o$  es afectada por todas estas cargas generándose otras fuerzas:  $F_1 = q_o E_1$ ,  $F_2 = q_o E_2$ ,  $F_3 = q_o E_3$ , etc.

La fuerza total ( $F_o$ ) aplicada sería como se aprecia a continuación:

$F_0 = q_0 (E_1 + E_2 + E_3 + \dots)$  por lo que  $F_0/q_0 = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$

Cuando la carga está distribuida, debemos evaluar si su distribución es continua y lo podemos hacer de la siguiente manera:

- Dividir la distribución de carga en pequeños elementos con una pequeña  $\Delta q$  en cada uno.
- Emplear la ley de Coulomb para determinar la fuerza y campo en cada uno de estos elementos.
- Determinar el campo total debido a las contribuciones obtenidas en el paso anterior, sumándolas todas.
- Si la separación es muy pequeña comparada con el punto de ubicación de la carga de prueba, la distribución puede considerarse continua. En este caso el campo estaría determinado de la siguiente manera:

$$E = K \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \sum \Delta q / r_i^2 \cdot \vec{r} = K \int dq / r^2 \cdot \vec{r}$$

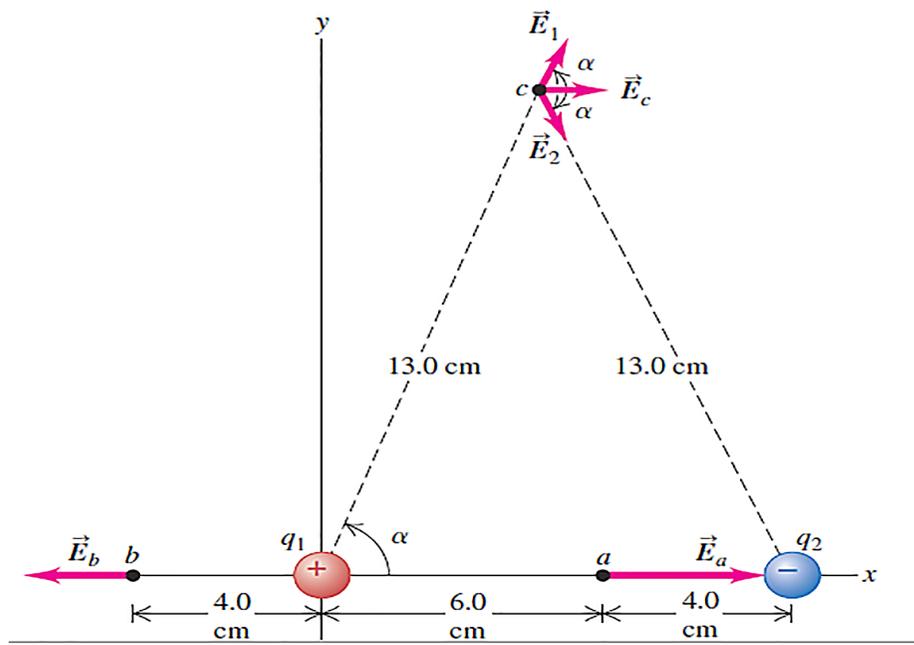
Para resolver esta integral hay que tener mucho cuidado y, en ciertos casos, será necesario utilizar datos como los que se muestran a continuación:

- Densidad de carga lineal ( $\lambda$ ), carga/m, en unidades C/m
- Densidad de carga superficial ( $\sigma$ ), carga por  $m^2$ , en unidades  $C/m^2$
- Densidad de carga Volumétrica ( $\rho$ ), Carga por  $m^3$ , en unidad  $C/m^3$

A continuación, veremos algunas situaciones de este tipo, a partir de los ejemplos.

### Ejemplo1:

“Dos cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  de +12 nC y -12 nC respectivamente, están separadas por una distancia de 0.10 m. Calcule el campo eléctrico causado por  $q_1$ , el campo causado por  $q_2$  y el campo total en el punto a” (Young & Freedman, 2009).



Primero determinamos el campo producido por cada carga sobre el punto a para, luego, sumarlos y determinar el campo total. Observemos que solo existe componente en x de la fuerza por lo que se obtienen los siguientes datos:

$$E = Kq/r^2$$

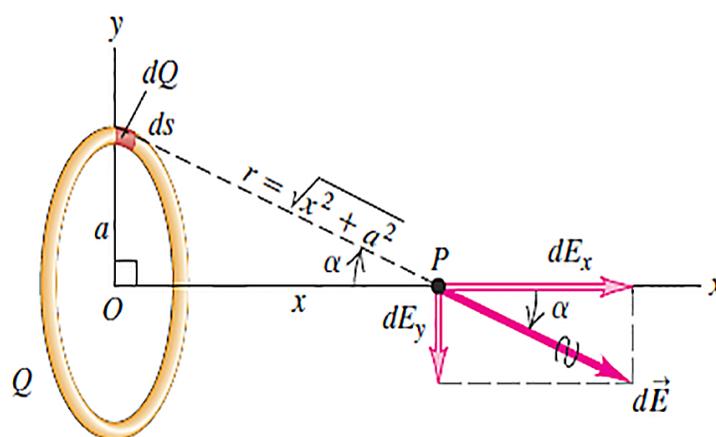
$$E_1 = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 (12 \times 10^{-9} \text{ C}) / (0,06 \text{ m})^2 = 30000 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 (12 \times 10^{-9} \text{ C}) / (0,04 \text{ m})^2 = 68000 \text{ N/C}$$

$$\text{Entonces } E_t = E_1 + E_2 = 98000 \text{ N/C}$$

### Ejemplo 2:

Un conductor en forma de anillo con radio  $a$  tiene una carga total  $Q$  distribuida de manera uniforme en todo su perímetro. Encuentre el campo eléctrico en el punto  $P$  que se localiza sobre el eje del anillo a una distancia  $x$  del centro.



Como vemos en este caso la carga se distribuye uniformemente alrededor del anillo. Para el desarrollo se ha considerado segmentos infinitesimales de la superficie ( $ds$ ), y de carga ( $dQ$ ), los cuales generarán un campo eléctrico en cada pequeña parte, y el campo eléctrico total será la suma de todos estos campos. Además, para facilitar nuestro cálculo asumiremos que el anillo está ubicado sobre el eje  $x$  como se ve en la figura y, como se observa, la misma es simétrica al eje en cuestión, así los componentes de los ejes  $y$  y  $z$  no existen, quedando solo los componentes  $x$ .

Para calcular  $E_x$ , observamos que la distancia  $r$  del segmento del anillo al punto  $P$  es:  $r^2 = x^2 + a^2$ , de manera que  $dE$  quedaría así:

$$dE = K dq / x^2 + a^2$$

$$\text{Consideramos que el } \cos \alpha = x/r = x / (x^2 + a^2)^{1/2}$$

$$\text{Así } dE_x = dE \cos \alpha = dE (x/r) = K dq x / (x^2 + a^2)^{3/2}$$

Como  $x$  no varía: y  $K = 1/4\pi\epsilon$

$$E_x = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{x dQ}{(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

$$E = E_x = 1/4\pi\epsilon \cdot Qx / (x^2 + a^2)^{1/2}$$

Porque la primera parte es una constante y la integral de  $dQ = Q$ .

## 5. DIPOLOS ELÉCTRICOS

Se denomina dipolo eléctrico a la combinación de dos cargas de signos opuestos e igual magnitud, las cuales están separadas por una distancia  $d$ .

Cuando este par de cargas se coloca en un campo eléctrico uniforme, la fuerza eléctrica neta es nula, ya que  $F = Eq$ , porque una es positiva ( $F_+$ ) y la otra negativa ( $F_-$ ); sin embargo, debido a que sus fuerzas no actúan en la misma dirección sus pares de torsión ( $\tau$ ) no son nulos, sino que son iguales y hacen girar el dipolo en sentido horario.

$$\tau = q E d \sin \Phi, \text{ siendo } \Phi = \text{el ángulo que forma el } E \text{ con el eje del dipolo.}$$

El momento dipolar eléctrico ( $p$ ) se define como  $p = qd$ , siendo  $q$  la carga y  $d$  la distancia entre las 2 cargas. Su unidad es Carga por metro (C.m), su dirección vectorial ocurre a lo largo del eje bipolar de la carga negativa a la positiva. Relacionando el momento dipolar con el par de torsión como se aprecia a continuación:

$$\tau = p E \sin \Phi$$

Un par de torsión en un campo eléctrico puede realizar un trabajo cuando el dipolo cambia de dirección, lo que origina también un cambio en su energía potencial. Este trabajo estaría definido de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-pE \sin \phi) d\phi \\
 &= pE \cos \phi_2 - pE \cos \phi_1
 \end{aligned}$$

Como el trabajo es la forma negativa del cambio de energía potencial, entonces la energía potencial queda definida así:

$$U(\phi) = -pE \cos \phi$$

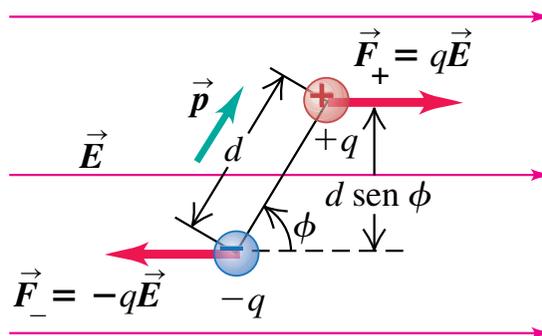


Figura 17. Dipolo eléctrico.  
 Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 735.



## TEMA N.º 2: LEY DE GAUSS

La determinación del campo eléctrico en superficies continuas no siempre es sencilla, sin embargo, la simetría de muchas superficies hizo posible que Gauss, basado en la Ley de Coulomb, hallara la forma de determinar el campo eléctrico en estas superficies.

### 1. CARGA Y FLUJO ELÉCTRICO

Para entender esto definimos las líneas de campo eléctrico como la visualización del campo eléctrico. Estas líneas apuntan en la misma dirección del campo eléctrico en cualquier punto y se relacionan con el campo eléctrico con los siguientes enunciados:

“El vector de campo eléctrico es tangente a la línea de campo en cada punto”

“El número de líneas por unidad de área a través de una superficie perpendicular es proporcional a la intensidad de campo en esa región” (Serway & Jewett, 2005, p. 659).

Conocido este concepto, definimos flujo eléctrico como la cantidad de líneas de campo que atraviesa una superficie. Si esta superficie encierra una carga neta, el número de líneas que la atraviesan será proporcional a la carga neta encerrada.

Como la cantidad de líneas de campo por unidad de área que atraviesa una superficie es proporcional a la intensidad de campo, podemos decir que el flujo eléctrico es igual a lo que se muestra a continuación:

$$\Phi = EA, \text{ donde } A \text{ es el área}$$

Las unidades en el S.I. son  $\text{Nm}^2/\text{C}$ .

Si la superficie no es perpendicular a las líneas de campo eléctrico, entonces el flujo quedará definido de la siguiente manera:

$\Phi = EA \cos \theta$ , siendo  $\theta$  el ángulo que forman la normal al área con el campo eléctrico.

Si analizamos el flujo en una superficie cerrada podemos expresar lo siguiente:

- Las cargas externas a la superficie no provocan un flujo eléctrico neto a través de la superficie.
- El sentido del flujo neto depende del signo de la carga encerrada.
- El flujo eléctrico neto es proporcional a la cantidad neta de la carga contenida en la superficie, pero independiente del tamaño de la superficie.

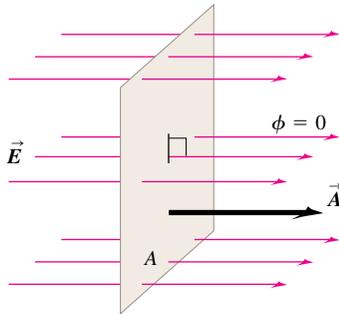
### 2. CÁLCULO DEL FLUJO ELÉCTRICO

Hemos visto la definición de flujo y su representación matemática, pero para su determinación se deben tener las siguientes consideraciones:

Si hablamos de flujo que atraviesa una superficie plana, deberemos considerar el ángulo que forman el campo eléctrico con la normal del área. A continuación, se puede ver tres casos:

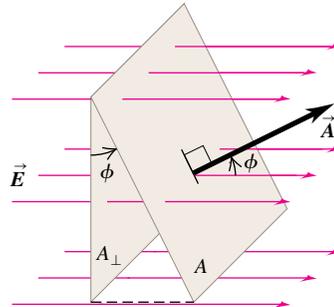
a) La superficie está de frente al campo eléctrico:

- $\vec{E}$  y  $\vec{A}$  son paralelos (ángulo entre  $\vec{E}$  y  $\vec{A}$  es  $\phi = 0$ ).
- El flujo  $\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA$ .



b) La superficie está inclinada un ángulo  $\phi$  respecto de la orientación de frente:

- El ángulo entre  $\vec{E}$  y  $\vec{A}$  es  $\phi$ .
- El flujo  $\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA \cos \phi$ .



c) La superficie está de canto en relación con el campo eléctrico:

- $\vec{E}$  y  $\vec{A}$  son perpendiculares (el ángulo entre  $\vec{E}$  y  $\vec{A}$  es  $\phi = 90^\circ$ ).
- El flujo  $\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA \cos 90^\circ = 0$ .

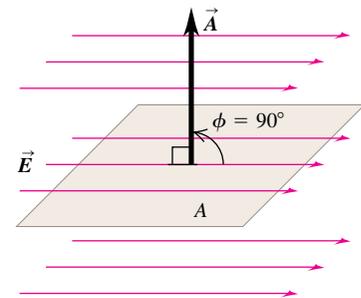


Figura 18. Flujo en una superficie.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 755.

En el primer caso, E y la normal al A son paralelos; por lo tanto,  $\Phi = E \cdot A$ ; en el segundo caso, existe un ángulo  $\Phi$ , entonces el flujo estaría dado por  $E \cdot A \cos \Phi$ ; por último, cuando E y la normal al área forman 90 grados, entonces el flujo es cero.

Pero las superficies no siempre son planas, si la superficie no es uniforme el flujo quedaría definido así:

$$\Phi_E = \int E \cos \phi dA = \int E_{\perp} dA = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (\text{definición general del flujo eléctrico})$$

En el caso de superficies cerradas como un cubo, una esfera u otra superficie similar se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones. Como lo explica Serway en el ejemplo de la figura que se muestra a continuación, nótese que los vectores de incremento de área están dirigidos en distintas direcciones, pero son perpendiculares al área en cada punto. Se aprecia que en la zona 1  $\Phi$  es menor de noventa, por lo tanto,  $\Phi = E \Delta A$  y este flujo es positivo; en la 2,  $\Phi = 90$  grados, por lo cual este flujo es cero; y en la 3,  $90 < \Phi < 180$ , donde  $\cos \Phi$  es negativo; por lo tanto, el flujo será negativo.

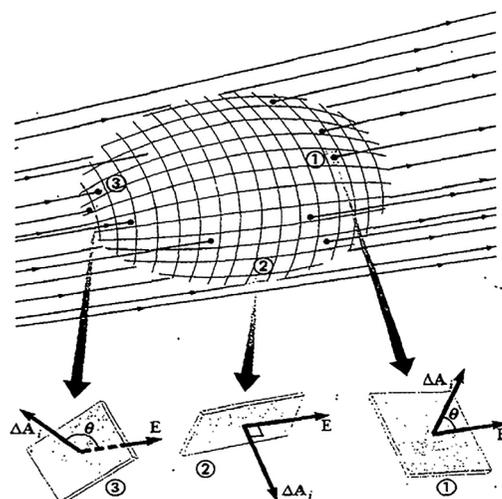


Figura 24.4 Una superficie cerrada en un campo eléctrico. Los vectores de área  $\Delta A_i$  son, por convención, normales a la superficie y apuntan hacia afuera. El flujo a través de un elemento de área puede ser positivo (elemento ①), cero (elemento ②), o negativo (elemento ③).

Figura 19. Flujo en una superficie cerrada

Fuente: Serway, 1995

En conclusión, el flujo neto será las líneas de flujo que salen menos las que entran a la superficie.

### 3. LEY DE GAUSS

En los apartados anteriores, hemos visto lo que es el flujo eléctrico y que este atraviesa una superficie cerrada; también, hemos hablado acerca del campo eléctrico y de las cargas; ahora, nos centraremos en conocer la ley de Gauss, la cual se dice que es una consecuencia de la ley de Coulomb. Con esta ley, Gauss relaciona el campo eléctrico con la carga encerrada en una superficie.

#### Carga puntual dentro de una superficie esférica:

Para iniciar este estudio, Gauss se imaginó una esfera de radio  $R$ , con una carga puntual  $q$  en el centro que generaba un campo eléctrico  $E$ , cuyas líneas de campo se extendían en forma radial hacia afuera en todas las direcciones y en forma perpendicular. A continuación se muestra la representación simbólica:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2}$$

En este caso, el flujo en esta esfera estaría definido de la siguiente manera:

$$\Phi_E = EA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} (4\pi R^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Que es lo que define la ley de Gauss: "el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga encerrada en ella" (Serway & Jewett, 2005).

Esta ley se aplica también a superficies que son irregulares, en las que el planteamiento sería así:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

En el caso de que no exista carga al interior de la superficie, el flujo es cero.

### 4. APLICACIONES DE LA LEY DE GAUSS

La ley de Gauss es aplicable, como hemos visto, a toda distribución de cargas y a cualquier superficie cerrada; la podemos usar para determinar el campo si se tiene la distribución de cargas, y esta es simétrica, o determinar la distribución de cargas si se conoce el campo. La idea es aprovechar la simetría de las superficies para poderla evaluar sin dificultades y según lo que se nos solicite.

Para resolver determinadas situaciones es bueno conocer, por ejemplo, que en el caso de los conductores sólidos si en ellos se coloca un exceso de carga, esta se distribuirá en la superficie.

Veremos el siguiente ejemplo tomado del libro *Física universitaria*:

Se coloca una carga positiva  $q$  en una esfera conductora sólida de radio  $R$ . Determine  $E$  en cualquier punto en el interior o en el exterior de la esfera.

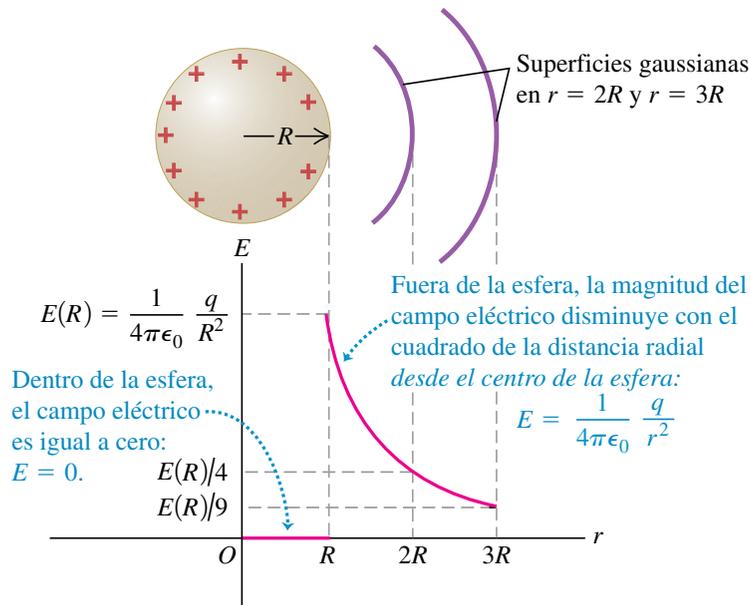


Figura 20. Distribución de cargas en un conductor, casos.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 762.

Por ser una esfera, la superficie es simétrica; por tanto, la carga se encuentra distribuida uniformemente en la superficie, el campo eléctrico debe ser radial y su magnitud depende de la distancia  $r$ .

Veamos qué pasa cuando  $R < r$ :

Como el conductor se queda en la esfera, la carga  $q$  también, el área de la superficie es uniforme  $A=4\pi r^2$ , por lo que la integral de flujo  $\int E dA$  quedaría de la siguiente manera:

$$E(4\pi r^2) = q/\epsilon_0, \text{ entonces } E = q/\epsilon_0 \cdot 4\pi r^2$$

Si  $R=r$ , tendríamos el mismo planteamiento y  $E=q/\epsilon_0 \cdot 4\pi r^2$ .

Si  $r < R$ , como la carga está distribuida en la superficie, no encierra ninguna carga; entonces, el campo eléctrico dentro de la esfera es cero.

## 5. CARGAS EN CONDUCTORES

Como definimos anteriormente, un material conductor es aquel en el que existen electrones que pueden desplazarse libremente. Asimismo, cuando no hay movimiento neto de carga se dice que está en equilibrio electrostático y, en estas condiciones, tiene las siguientes propiedades:

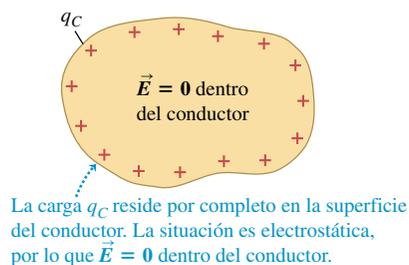
“–El campo eléctrico es cero en cualquier punto del conductor.

- Cualquier carga de un conductor aislado reside en su superficie.
- El campo eléctrico justo afuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del conductor y tiene una magnitud de  $\sigma/\epsilon_0$ , siendo  $\sigma$  carga por unidad de área en ese punto.

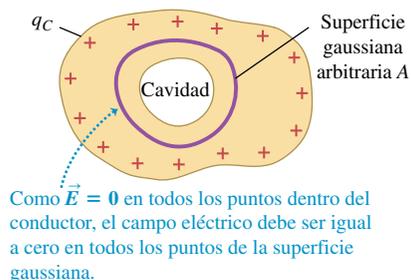
- En un conductor de forma irregular, la carga tiende a acumularse en puntos donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeña" (Serway & Faughn, 2001, p. 513).

En el caso que el conductor tenga una cavidad interior y no hay carga dentro de la cavidad, se asume que  $E=0$ , pero si la hubiera, implicaría la aplicación de la ley de Gauss y nos llevaría a un reordenamiento de cargas, distribuyéndolas en la superficie del conductor.

a) Conductor sólido con carga  $q_C$



b) El mismo conductor con una cavidad interna



c) Se coloca en la cavidad una carga aislada  $q$

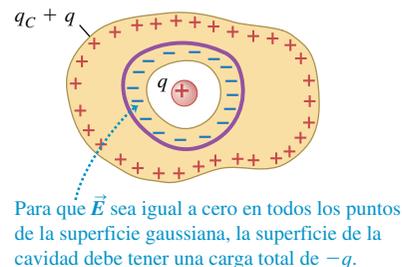


Figura 21. Distribución de cargas en un conductor, casos.

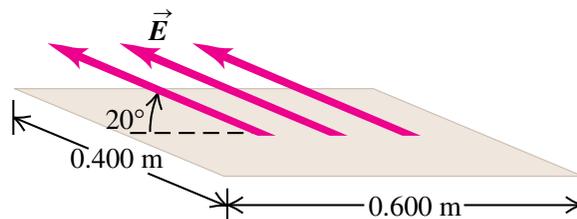
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 767.



## ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 2

Resuelva los siguientes ejercicios utilizando como base lo aprendido en estos dos temas:

1. Tres cargas puntuales están en línea. La carga  $q_3 = +5.00 \text{ nC}$  está en el origen. La carga  $q_2 = -3.00 \text{ nC}$  se encuentra en  $x = +4.00 \text{ cm}$ . La carga  $q_1$  está en  $x = +2.00 \text{ cm}$ . ¿Cuál es  $q_1$  (magnitud y signo) si la fuerza neta sobre  $q_3$  es igual a cero?
2. Tres cargas puntuales están alineadas a lo largo del eje  $x$ . La carga  $q_1 = +3.00 \text{ uC}$  está en el origen y la carga  $q_2 = -5.00 \text{ uC}$  se encuentra en  $x = 0.200 \text{ m}$ . La carga  $q_3 = -8.00 \text{ uC}$ . ¿Dónde está situada  $q_3$  si la fuerza neta sobre  $q_1$  es de  $7.00 \text{ N}$  en la dirección negativa del eje  $x$ ?
3. Se coloca un protón en un campo eléctrico uniforme de  $2.75 \times 10^3 \text{ N/C}$ . Calcule: a) la magnitud de la fuerza eléctrica ejercida sobre el protón; b) la aceleración del protón; c) la rapidez del protón después de estar  $1.00 \text{ us}$  en el campo si se supone que parte del reposo.
4. Una carga puntual de  $+2.00 \text{ nC}$  está en el origen y una segunda carga puntual de  $-5.00 \text{ nC}$  está en el eje  $x$  en  $x = 0.800 \text{ m}$ . a) Encuentre el campo eléctrico (magnitud y dirección) en cada uno de los puntos siguientes sobre el eje  $x$ : i)  $x = 0.200 \text{ m}$ ; ii)  $x = 1.20 \text{ m}$ ; iii)  $x = -0.200 \text{ m}$ . b) Calcule la fuerza eléctrica neta que las dos cargas ejercerían sobre un electrón colocado en cada punto del inciso a).
5. En un sistema de coordenadas rectangulares, se coloca una carga puntual positiva  $q = 6.00 \times 10^{-9}$  en el punto  $x = +0.150 \text{ m}$ ,  $y = 0$  y otra carga puntual idéntica se sitúa en  $x = -0.150 \text{ m}$ ,  $y = 0$ . Encuentre las componentes  $x$  y  $y$ , la magnitud y la dirección del campo eléctrico en los siguientes puntos: a) el origen; b)  $x = 0.300 \text{ m}$ ,  $y = 0$ ; c)  $x = 0.150 \text{ m}$ ,  $y = 0.400 \text{ m}$ ; d)  $x = 0$ ,  $y = 0.200 \text{ m}$ .
6. Las cargas puntuales  $q_1 = -4.5 \text{ nC}$  y  $q_2 = 4.5 \text{ nC}$  están separadas  $3.1 \text{ mm}$ , y forman un dipolo eléctrico. Calcule el momento dipolar eléctrico (magnitud y dirección).
7. Una lámina plana tiene forma rectangular con lados de longitud  $0.400 \text{ m}$  y  $0.600 \text{ m}$ . La lámina está inmersa en un campo eléctrico uniforme de magnitud  $75.0 \text{ N/C}$  dirigido a  $20^\circ$  con respecto al plano de la lámina. Encuentre la magnitud del flujo eléctrico a través de la lámina.



## TEMA N.º 3: POTENCIAL ELÉCTRICO

El principio de conservación de energía es un concepto muy conocido por nosotros, pues lo hemos revisado en distintos temas y esta vez veremos cómo en la electrostática también resulta muy valioso. Además, recordemos que la fuerza electrostática que planteó Coulomb es conservativa; por lo tanto, los fenómenos referidos a esta pueden ser definidos como términos de energía.

### 1. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Cuando existe un desplazamiento de carga en un campo eléctrico, el campo hace una fuerza que realiza un trabajo sobre dicha carga. Este trabajo se puede definir en función a la energía potencial, pero a diferencia de la altura cuando hablamos de gravedad, utilizamos para este caso la posición de la carga en el campo.

El trabajo realizado por la fuerza al trasladar la partícula de un punto "a" a un punto "b" lo podemos representar así:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot \vec{dl} = \int_a^b F \cos \phi dl \quad \text{Trabajo realizado por una fuerza}$$

Donde  $l$  es un desplazamiento infinitesimal a lo largo de la trayectoria de la partícula, y  $\Phi$  es el ángulo entre  $\vec{F}$  y  $\vec{dl}$  en cada punto de la trayectoria.

Cuando una fuerza es conservativa, como en este caso, el trabajo realizado por ella al desplazarse de "a" a "b" puede ser expresado en función de la energía potencial ( $U$ ) de la siguiente manera:

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = -(U_b - U_a) = -\Delta U \quad \text{(trabajo efectuado por una fuerza conservativa)}$$

Si el trabajo es positivo significa que la energía potencial en "a" es mayor que "b", y que la energía potencial está disminuyendo.

En analogía con la definición clásica de trabajo, podríamos decir que el trabajo realizado por el campo eléctrico es el producto de la fuerza por la componente del desplazamiento en dirección de la fuerza y no depende de la trayectoria como se aprecia a continuación:

$$W_{a \rightarrow b} = Fd = q_0 E d$$

#### **Energía potencial eléctrica de dos cargas puntuales:**

La energía potencial  $U$ , cuando la carga de prueba  $q_0$  está a cualquier distancia  $r$  de la carga  $q$ , es la siguiente:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} \quad \text{(energía potencial eléctrica de dos cargas puntuales } q \text{ y } q_0\text{)}$$

La expresión es válida para cualquier combinación de signos de las cargas. Entonces, la energía potencial será positiva si las cargas son de igual signo y negativa si son diferentes.

Según Young & Freedman (2009), podríamos definir energía potencial como el trabajo que realizaría el campo de  $q$  sobre la carga de prueba  $q_0$  si esta última se desplazara de una distancia inicial  $r$  al infinito. Si  $q$  y  $q_0$  tienen el mismo signo, la interacción será de repulsión, por tanto, este trabajo será positivo y  $U$  será positiva en cualquier separación finita. En cambio, si las cargas tienen signos opuestos, la interacción es de atracción, el trabajo efectuado será negativo y  $U$  será negativa.

Para varias cargas la energía potencial se puede expresar de la siguiente manera:

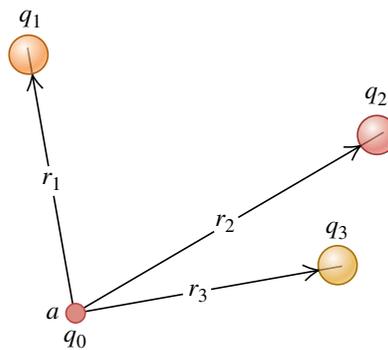


Figura 22. Energía potencial en distintas cargas.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 785.

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (\text{carga puntual } q_0 \text{ y conjunto de cargas } q_i)$$

## 2. POTENCIAL ELÉCTRICO

El potencial es la energía potencial por unidad de carga. Se define el potencial  $V$  en cualquier punto en el campo eléctrico como la energía potencial  $U$  por unidad de carga asociada con una carga de prueba  $q_0$  en ese punto:

$$V = \frac{U}{q_0} \quad \text{o bien,} \quad U = q_0 V$$

Tanto la energía potencial como la carga son escalares, por lo que el potencial es una cantidad escalar. Sus unidades se encuentran, dividiendo las unidades de energía entre las de carga. La unidad del S.I. para el potencial se llama volt (1 V) y es igual a 1 joule por coulomb (Young & Freedman, 2009, pp. 787-788).

Ramos (2010) nos dice lo siguiente sobre el potencial: “Es una magnitud escalar cuyo valor mide el trabajo realizado sobre cada unidad de carga positiva para desplazarla desde el infinito hasta el punto P que se encuentra influenciado por un campo eléctrico.”

Así el potencial de  $a$  con respecto a  $b$  es igual al trabajo realizado por la fuerza eléctrica cuando una unidad de carga se desplaza de  $a$  a  $b$ .

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = - \frac{\Delta U}{q_0} = - \left( \frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0} \right) = - (V_b - V_a) = V_a - V_b$$

Donde  $V_a - V_b$  se denomina diferencia de potencial.

### 3. CÁLCULO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO EN CARGAS PUNTUALES

Para encontrar el potencial  $V$  debido solo a una carga puntual  $q$  podemos usar la siguiente fórmula:

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (\text{potencial debido a una carga puntual})$$

Donde  $r$  es la distancia de la carga puntual  $q$  al punto en que se evalúa el potencial.

Si  $q$  es positiva, el potencial que produce es positivo en todos los puntos; sin embargo, si  $q$  es negativa, produce un potencial negativo en cualquier lugar. En cualquier caso,  $V$  es igual a cero cuando  $r$  está a una distancia infinita de la carga puntual. Observemos que el potencial, como el campo eléctrico, es independiente de la carga de prueba  $q_0$  que se utiliza para definirlo.

De manera similar, para encontrar el potencial debido a un conjunto de cargas puntuales se empleará la siguiente fórmula:

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (\text{potencial debido a un conjunto de cargas puntuales})$$

El trabajo de llevar la carga de  $a$  hasta  $b$ , también, se puede expresar en función de la fuerza y el campo eléctrico como se aprecia a continuación:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Si a esta expresión se la divide entre  $q_0$ , tendremos la expresión diferencia de potencial, en función de  $E$ :

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos\phi \, dl \quad (\text{diferencia de potencial como integral de } \vec{E})$$

La diferencia de potencial es diferente que la diferencia de energía potencial. La primera es proporcional al cambio de energía potencial y se representa así:  $\Delta U = q_0 \Delta V$

### 4. CÁLCULO DEL POTENCIAL ELÉCTRICO EN CARGAS DISTRIBUIDAS

Cuando se tiene una distribución continua de carga a lo largo de una línea, sobre una superficie o a través de un volumen, se divide la carga en elementos  $dq$  y la sumatoria vista anteriormente se convierte en la siguiente integral:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (\text{potencial debido a una distribución continua de carga})$$

### 5. SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

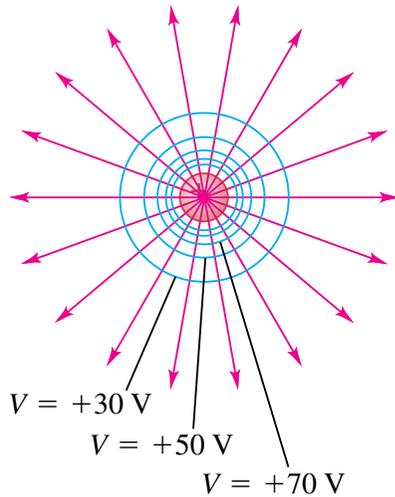
Una superficie equipotencial es aquella en la que todos los puntos tienen el mismo potencial eléctrico y se pueden representar, al igual que las líneas de nivel en un mapa topográfico, en las líneas de campo.

Si se desplaza una carga de prueba por una superficie equipotencial, como no hay cambio de energía potencial, el campo eléctrico no hace trabajo sobre esa carga.

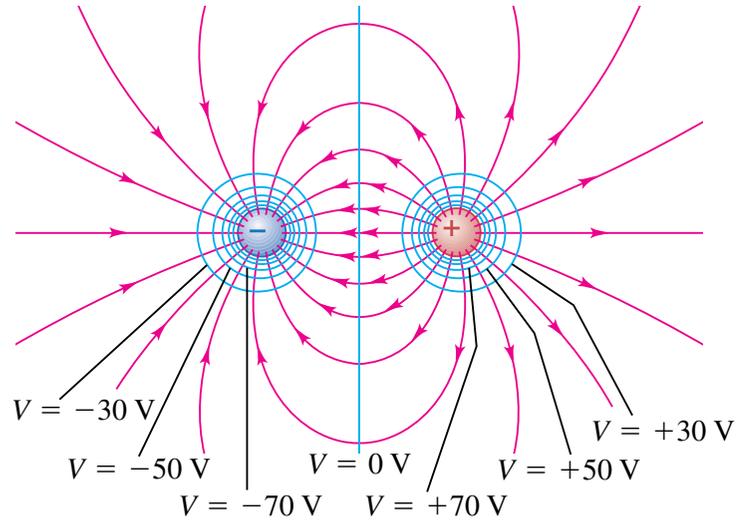
En cada cruce de línea de campo con una línea equipotencial, esta es perpendicular.

Observemos las líneas azules de los siguientes gráficos que representan diferentes campos equipotenciales:

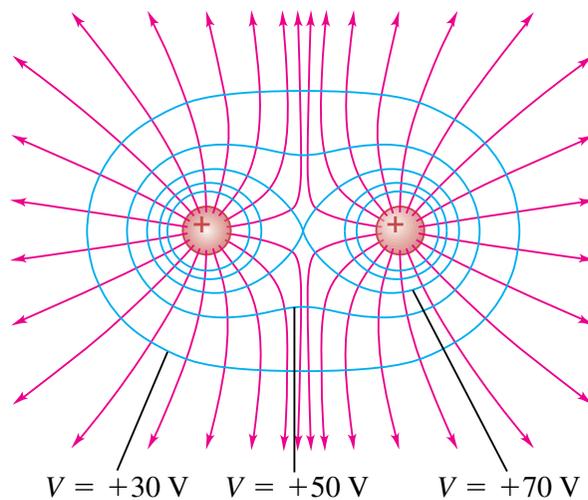
a) Una sola carga positiva



b) Un dipolo eléctrico



c) Dos cargas iguales positivas



→ Líneas de campo eléctrico

— Secciones transversales de superficies equipotenciales

Figura 23. Campos equipotenciales

Fuente: Young & Freedman 2009, p. 799

Nota: La superficie de un conductor es equipotencial si todas las cargas están en reposo.

## TEMA N.º 4: CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS

Para tratar de este tema, hablaremos primero de un dispositivo que se usa en láseres, sensores, filtros alimentadores de corriente, circuitos de corriente alterna, circuitos temporizadores, entre otros. Nos referimos al condensador o capacitor, el cual permite almacenar energía potencial eléctrica y carga eléctrica, y cumple un papel crucial en circuitos de corriente alterna. Además, posee una característica denominada capacitancia, cuyo concepto se explicará con más detalle en el siguiente punto.

### 1. CAPACITANCIA

Se define como una magnitud escalar que nos da la razón entre la carga de cada conductor y la diferencia de potencial. Sus unidades en el S.I. son los faradios= $C/V$ .

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad (\text{definición de capacitancia})$$

Esta magnitud depende de la forma y tamaño de los conductores que lo forman y el aislante si lo tuviera.

Para entender un poco más esto describiremos cómo es un capacitor. El capacitor está formado por dos placas conductoras separadas a una distancia determinada y, en esta separación, puede no haber nada (vacío) o puede estar incluido un aislante.

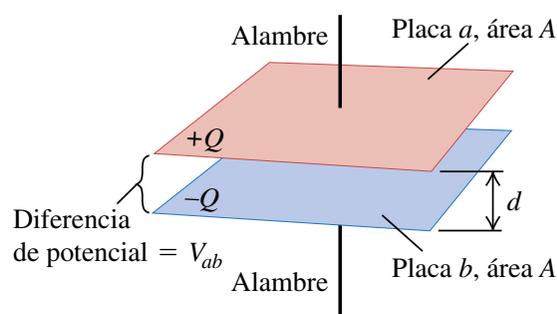


Figura 24. Condensador

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 817

Su representación en un diagrama de circuito está dada de la siguiente manera:



Cuando se dice que un capacitor tiene carga  $Q$ , o que una carga  $Q$  está almacenada en el capacitor, significa que el conductor con el potencial más elevado tiene carga  $+Q$  y el conductor con el potencial más bajo tiene carga  $-Q$  (si se supone que  $Q$  es positiva).

La forma de cargar un capacitor es con cables conectados a una batería. Una vez cargado el capacitor, esta se desconecta y la diferencia de potencial es fija e igual al voltaje de la batería.

Líneas arriba dijimos que esta capacitancia dependía de la forma y tamaño del condensador, en ese sentido, podemos relacionarla de la siguiente manera:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{capacitancia de un capacitor de placas paralelas con vacío})$$

Donde A es el área; d, la distancia entre las placas; y  $\epsilon_0$ , una constante universal en este caso en el vacío. Cuando haya otro material entre las placas, esta constante variará siendo para ese caso el valor de  $\epsilon_0$  el siguiente:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

## 2. ASOCIACIÓN DE CAPACITORES

Los capacitores pueden ser asociados de diferentes maneras y según su asociación, ya sea en serie o paralelo, tienen determinadas características.

### 2.1. En serie:

Se dice que un circuito tiene condensadores asociados en serie cuando son ubicados uno al costado del otro. En este caso, la magnitud de la carga en todas las placas es la misma.

#### Capacitores en serie:

- Los capacitores tienen la misma carga  $Q$ .
- Sus diferencias de potencial se suman:

$$V_{ac} + V_{cb} = V_{ab}$$

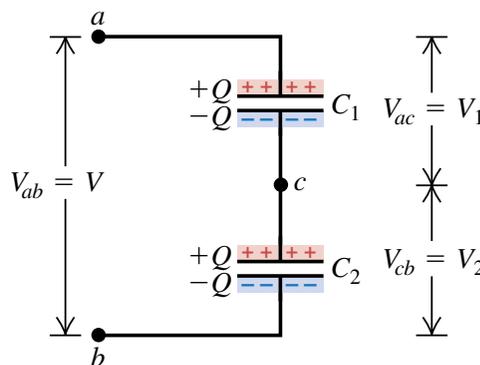


Figura 25. Condensadores en serie.  
Fuente: Young & Freedman, 2009 p. 821.

Como se aprecia en la imagen se cumple lo siguiente:

$$V_{ac} = V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad V_{cb} = V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$V_{ab} = V = V_1 + V_2 = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

La capacitancia equivalente está dada como se muestra a continuación:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (\text{capacitores en serie})$$

## 2.2. En paralelo:

### Capacitores en paralelo:

- Los capacitores tienen el mismo potencial  $V$ .
- La carga en cada capacitor depende de su capacitancia:  $Q_1 = C_1V$ ,  $Q_2 = C_2V$ .

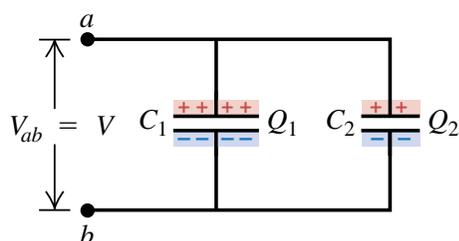


Figura 26. Condensadores en paralelo.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 821.

En esta distribución se cumple que los condensadores al estar conectados a la misma batería, la diferencia de potencial es la misma, pues la carga se distribuye entre los capacitores y la capacitancia equivalente es la suma de las capacitancias de cada capacitor; además, las cargas en cada capacitor obedecen a esta ecuación:

$$Q_1 = C_1V \quad \text{y} \quad Q_2 = C_2V$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)V$$

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (\text{capacitores en paralelo})$$

## 3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

La capacidad de almacenar energía es una de las principales razones por las que se usa los capacitores. La cantidad de trabajo requerido para cargar uno de ellos es igual a la energía potencial almacenada en el mismo; al descargarse, la energía almacenada se recupera en forma de trabajo realizado por las fuerzas eléctricas.

Podemos determinar la energía potencial  $U$  de un capacitor con carga mediante el cálculo del trabajo  $W$  que se requiere para cargarlo. Suponga que cuando se carga el capacitor, la carga final es  $Q$  y la diferencia de potencial final es  $V$ . Según la ecuación, estas cantidades están relacionadas de la siguiente forma:

$$V=Q/C$$

El trabajo necesario para incrementar la carga es el siguiente:

$$W = \int_0^W dW = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C} \quad (\text{trabajo para cargar el capacitor})$$

La energía almacenada será así:

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (\text{energía potencial almacenada en un capacitor})$$

## 4. DIELECTRICOS

Es un material no conductor que, cuando se coloca entre las placas de un condensador, tiene los siguientes beneficios:

- Soluciona el problema mecánico de mantener 2 placas con una separación sin que hagan contacto.
- El dieléctrico incrementa al máximo la diferencia de potencial entre las placas del condensador.
- La presencia de un dieléctrico entre las placas de un condensador aumenta su capacitancia.

En este material puede ocurrir lo que se conoce como la ruptura de un dieléctrico que se da cuando el campo eléctrico es lo suficientemente grande y el dieléctrico experimenta una ionización parcial.

La presencia de un dieléctrico nos lleva a conocer lo que es la constante dieléctrica ( $K$ ), la cual está definida como la razón de la relación entre la capacitancia con el material dieléctrico y la capacitancia inicial o al vacío. A continuación, se muestran dichas representaciones:

$$K = C/C_0 \quad V = V_0/K$$

En la siguiente tabla, se pueden observar los valores de la constante dieléctrica:

Tabla 3  
Valores de la constante dieléctrica,  $K$ , 20 °C

Material	$K$	Material	$K$
Vacío	1	Cloruro de polivinilo	3.18
Aire (a 1 atm)	1.00059	Plexiglás	3.40
Aire (a 100 atm)	1.0548	Vidrio	5–10
Teflón	2.1	Neopreno	6.70
Polietileno	2.25	Germanio	16
Benceno	2.28	Glicerina	42.5
Mica	3–6	Agua	80.4
Mylar	3.1	Titanato de estroncio	310

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 829.

Cuando la carga se mantiene constante, y se coloca un material dieléctrico entre las placas de un capacitor, la diferencia de potencial entre aquellas disminuye en un factor  $K$ . Por lo tanto, el campo eléctrico entre las placas debe reducirse en el mismo factor. Si  $E_0$  es el valor del campo eléctrico en el vacío y  $E$  es el valor con dieléctrico, entonces se concluye lo siguiente:

$$E = E_0/K$$

Otro concepto interesante y muy usado es el de permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ), que se define como una constante que nos indica cómo varía un campo eléctrico por un medio. Matemáticamente, se representa con la siguiente relación:

$$\epsilon = K\epsilon_0$$

Que en función del campo eléctrico sería como se aprecia a continuación:

$$E = \sigma / \epsilon$$

Siendo  $\sigma$  la densidad superficial de carga inducida.

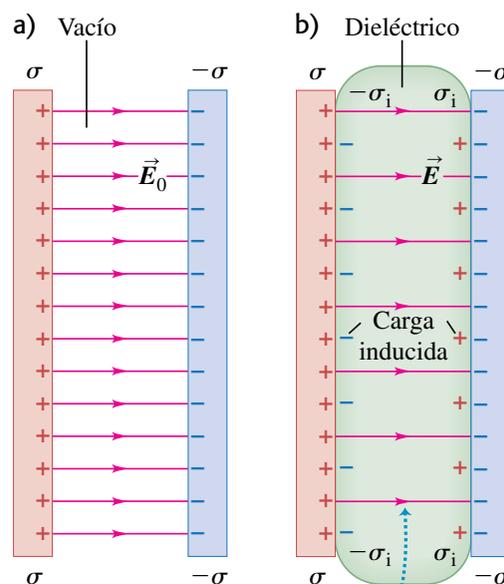
Por otro lado, cuando hay un dieléctrico, la capacitancia estará dada así:

$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (\text{capacitor de placas paralelas, dieléctrico entre las placas})$$

### Ejemplo:

Este ejemplo, tomado del texto de Hugh Young, nos sirve para ilustrar la aplicación de algunas de las relaciones explicadas anteriormente.

Suponga que cada una de las placas paralelas de la figura tiene un área de  $2000 \text{ cm}^2$  ( $2.00 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ ) y están separadas por  $1.00 \text{ cm}$  ( $1.00 \times 10^{-2} \text{ m}$ ). El capacitor está conectado a una fuente de energía y se carga a una diferencia de potencial  $V_0 = 3000 \text{ V}$ . Después se desconecta de la fuente de energía y se inserta entre las placas una lámina de material plástico aislante, llenando por completo el espacio entre ellas. Se observa que la diferencia de potencial disminuye a  $1000 \text{ V}$  y que la carga en cada placa del capacitor permanece constante. Calcule a) la capacitancia original  $C_0$ ; b) la magnitud de la carga  $Q$  en cada placa; y c) la capacitancia  $C$  después de haber insertado el dieléctrico.



Para una densidad de carga dada  $\sigma$ , las cargas inducidas en las superficies del dieléctrico reducen el campo eléctrico entre las placas.

Figura 27. Dieléctricos en capacitores  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 829.

- a) Como tenemos el área y la distancia y conocemos  $\epsilon_0$ , podemos determinar  $C_0$  aplicando lo siguiente:

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot A/d$$

$$\text{Entonces, } C_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} (2 \times 10^{-1} \text{ m}^2) / 1 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,77 \times 10^{-10} \text{ F}$$

- b) Utilizando la definición de capacitancia podemos hallar  $Q$ .

$$Q = C_0 V_0$$

$$Q = (1,77 \times 10^{-10} \text{ F})(3000 \text{ V}) = 5,31 \times 10^{-7} \text{ C}$$

- c) Cuando se coloca el dieléctrico  $V$ , disminuye. Aplicando la definición tenemos, considerando que la carga no varía, lo siguiente:

$$C = 5,31 \times 10^{-7} \text{ C} / 1000 \text{ V} = 5,31 \times 10^{-10} \text{ F}$$

## 5. LEY DE GAUSS EN LOS DIELECTRICOS

---

Para cualquier superficie gaussiana, siempre que la carga inducida sea proporcional al campo eléctrico en el material, la ley de Gauss puede expresarse de la siguiente forma:

$$\oint \mathbf{K}\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{enc-libre}}{\epsilon_0} \quad (\text{ley de Gauss en un dieléctrico})$$

Donde  $Q_{enc-libre}$  es la carga *libre* total (no la carga ligada) encerrada por la superficie gaussiana.



### LECTURA SELECCIONADA N.º 2

---

San Martín, J.I. Zamora, I., San Martín, J.J., Aperribay, V. & Eguía, P. (2011). *Energy store technologies for electric applications*. Trabajo presentado en International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE-PQ'11), Las Palmas de Gran Canaria, España. Versión en castellano, disponible en <https://goo.gl/CeRpsU>



## GLOSARIO DE LA UNIDAD II

---

### C

#### CARGA CUANTIZADA

Cantidad observable de carga eléctrica (Young & Freedman, 2009).

#### CARGAS INDUCIDAS

Cargas negativas excedentes (Young & Freedman, 2009).

### E

#### ELECTROSTÁTICA

Rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por cargas estáticas (Ramos, 2010).

### I

#### IONIZACIÓN

Ganancia o pérdida de protones o electrones (Serway, Física, Tomo II, 1995).

### L

#### LÍNEA DE CAMPO ELÉCTRICO

Es una recta o curva imaginaria trazada a través de una región del espacio, de modo que es tangente en cualquier punto que esté en la dirección del vector del campo eléctrico en dicho punto (Serway, Física, Tomo II, 1995).



## BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD II

---

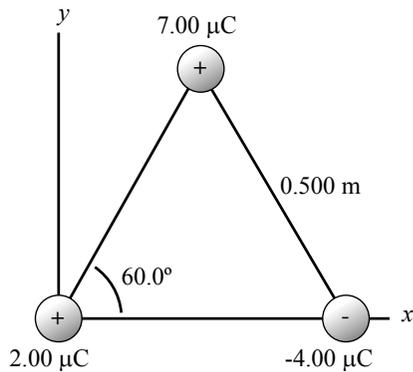
- Giancoli, D. (2001). *Física para ciencias e ingeniería*. México: Pearson Educación.
- Ramos, F. (2010). *Física: Teoría y práctica*. Lima: Empresa editora Macro E.I.R.L.
- San Martín, J.I. Zamora, I., San Martín, J.J., Aperribay, V. & Eguía, P. (2011). *Energy store technologies for electric applications*. Trabajo presentado en International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'11), Las Palmas de Gran Canaria, España. Disponible en: <http://icrepq.com/icrepq'11/398-san-martin.pdf>
- Serway, R. A. & Faughn, J. S. (2001). *Física* (5ª ed.). México: Pearson Educación.
- Serway, R. A. & Jewett, J. W. (2005). *Física para ciencias e ingeniería* (7ª ed., Vols. 1-2). México: Cengage Learnig. Volumen 1 disponible en: <http://www.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisIClver/FpCelS7EdV1.pdf> y volumen 2 en [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299010/Carpeta\\_AVA/Fisica\\_2.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299010/Carpeta_AVA/Fisica_2.pdf)
- Young, H. & Freedman, R. (2009). *Física universitaria con física moderna* (12ª ed., Vols. 1-2). México: Pearson Educación. Volumen 1 disponible en <http://fis.ucv.cl/docs/Fis231/textos/Fisica-Universitaria-Sears-Zemansky-12va-Edicion-Vol1.pdf> y volumen 2 en [https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi\\_blog/r/Fisica\\_General\\_-\\_Fisica\\_Universitaria\\_Vol\\_2\\_ed\\_12\(Sears-Zemansky\).pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2_ed_12(Sears-Zemansky).pdf)



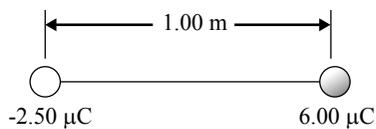
## AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD II

Resuelva los siguientes problemas y marque su respuesta utilizando los conceptos aprendidos en esta unidad. Cada pregunta vale 2 puntos.

1. Tres cargas puntuales se colocan en las esquinas de un triángulo equilátero, como se muestra en la figura. Calcule la magnitud de la fuerza eléctrica neta sobre la carga de  $7\mu\text{C}$ .\*



- a) 0,873 N  
b) 3,657N  
c) 7,89N  
d) 8,94N
2. En la figura determina el punto, diferente al infinito, en el cual el campo eléctrico es cero. \*



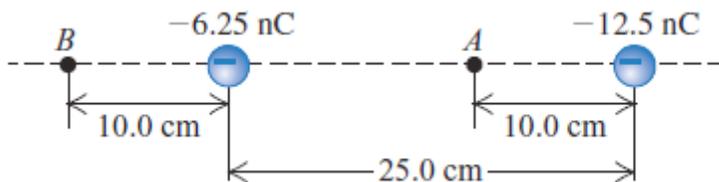
- a) 2,21 m a la derecha  
b) 1,82 m a la izquierda  
c) 3,87 m a la derecha  
d) 1,97 m a la izquierda
3. La carga total en un sistema aislado es la siguiente:
- a) variable  
b) constante

- c) Se incrementa con el tiempo
- d) Depende de la distancia

4. Tres cargas puntuales están alineadas a lo largo del eje x. La carga  $q_1 = +3.00 \text{ uC}$  está en el origen y la carga  $q_2 = -5.00 \text{ uC}$  se encuentra en  $x = 0.200 \text{ m}$ . La carga  $q_3 = -8.00 \text{ uC}$ . ¿Dónde está situada  $q_3$  si la fuerza neta sobre  $q_1$  es de  $7.00 \text{ N}$  en la dirección negativa del eje x?

- a) 0,154m
- b) -1.234m
- c) -2,43m
- d) -0,144m

5. Dos cargas puntuales están separadas por  $25.0 \text{ cm}$ . Encuentre el campo eléctrico neto que producen tales cargas en el punto a. \*\*



- a)  $6,75 \times 10^2 \text{ N/C}$  a la derecha
- b)  $7,75 \times 10^3 \text{ N/C}$  a la izquierda
- c)  $8,75 \times 10^3 \text{ N/C}$  a la derecha
- d)  $9,56 \times 10^2 \text{ N/C}$  a la izquierda

6. Se mide un campo eléctrico de  $1.25 \times 10^6 \text{ N/C}$  a una distancia de  $0.150 \text{ m}$  de una carga puntual. ¿Cuál es el flujo eléctrico a través de una esfera a esas distancias de la carga?

- a)  $4.5 \times 10^6 \text{ Nm}^2/\text{C}$
- b)  $3.53 \times 10^6 \text{ N.m}^2/\text{C}$
- c)  $6,56 \times 10^5 \text{ Nm}^2/\text{C}$
- d)  $2.54 \times 10^5 \text{ Nm}^2/\text{C}$

7. Una carga puntual de  $9.60 \text{ uC}$  está en el centro de un cubo con lados cuya longitud mide  $0.500 \text{ m}$ . ¿Cuál es el flujo eléctrico a través de una de las seis caras del cubo?

- a)  $2,87 \times 10^5 \text{ Nm}^2/\text{C}$
- b)  $3,56 \times 10^5 \text{ Nm}^2/\text{C}$

- c)  $1,81 \times 10^5 \text{Nm}^2/\text{C}$   
d)  $0,87 \times 10^5 \text{Nm}^2/\text{C}$
8. El campo eléctrico a una distancia de 0.145 m de la superficie de una esfera sólida aislante con radio de 0.355 m es de 1750 N/C. Suponiendo que la carga de la esfera se distribuye con uniformidad, ¿cuál es la densidad de carga en su interior?
- a)  $4,67 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^3$   
b)  $3,56 \times 10^{-6} \text{C}/\text{m}^3$   
c)  $1,45 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^3$   
d)  $2,59 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^3$
9. ¿Cuánta carga existe en cada placa de un capacitor de 4 uF cuando se conecta a una batería de 12V?
- a) 48uC  
b) 60uC  
c) 75uC  
d) 30uC
10. Dos capacitores de  $C_1=5\mu\text{F}$  y  $C_2=12\mu\text{F}$  están conectados en paralelos y la combinación resultante está conectada a una batería de 9 voltios. ¿Cuál es la capacitancia equivalente en la combinación? ¿La diferencia de potencial y la carga en cada capacitor es?
- a) 15uF, 12V, 50uC y 216uC  
b) 17uF, 9V, 45uC y 108uC  
c) 45uF, 18V, 30uCy 120uC  
d) 36uF, 36V, 48uC, 126uC



UNIDAD III

# ELECTRODINÁMICA Y ELECTROMAGNETISMO

 DIAGRAMA DE ORGANIZACIÓN DE LA UNIDAD III



## ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES

### Resultado de aprendizaje de la Unidad III:

Al finalizar la unidad el estudiante será capaz de resolver ejercicios y problemas sustentado en los principios de la electrodinámica y electromagnetismo; empleando instrumentos, técnicas y formulas en un trabajo de laboratorio.

CONOCIMIENTOS	HABILIDADES	ACTITUDES
<p><b>Tema N.º 1: CORRIENTE, RESISTENCIA Y FUERZA ELECTROMOTRIZ</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Corriente Eléctrica</li> <li>2 Densidad de corriente</li> <li>3 Resistencia Eléctrica</li> <li>4 Ley de OHM</li> <li>5 Fuerza electromotriz y circuitos</li> </ol> <p><b>Tema N.º 2: CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Resistores en serie y paralelo</li> <li>2 Leyes de Kirchoff</li> <li>3 Instrumentos de medición eléctrica (amperímetro y voltímetros)</li> </ol> <p><b>Tema N.º 3: CAMPO MAGNÉTICO Y FUERZAS MAGNÉTICAS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Magnetismo</li> <li>2 Campo magnético</li> <li>3 Líneas de campo y flujo magnético</li> <li>4 Movimiento de partículas con carga en un campo magnético</li> <li>5 Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente</li> <li>6 Fuerza y momento de torsión en una espira de corriente</li> <li>7 El motor de corriente continua</li> </ol> <p><b>Tema N.º 4: FUENTES DE CAMPO MAGNÉTICO</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Campo magnético de una carga en movimiento, de un elemento de corriente y de un conductor recto que transporta corriente</li> <li>2 Fuerza entre conductores paralelos</li> <li>3 Campo magnético de una espira circular de corriente</li> <li>4 Ley de Ampere y sus aplicaciones</li> </ol> <p><b>Tema N.º 5: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Experimento de inducción</li> <li>2 Ley de Faraday</li> <li>3 Ley de Lenz</li> <li>4 Fuerza Electromotriz de movimiento</li> </ol> <p><b>Autoevaluación de la Unidad III</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza instrumentos, técnicas y fórmulas, para aplicar en la corriente eléctrica, circuitos eléctricos, campo magnético, e inducción electromagnética.</li> <li>• Resuelve ejercicios sobre corriente eléctrica, circuitos eléctricos, campo magnético, e inducción electromagnética.</li> <li>• Realiza experimentos en laboratorio.</li> <li>• Redacta correctamente los informes de laboratorio.</li> </ul> <p><b>Actividad N.º 3</b> Resolución de problemas propuestos</p> <p><b>Control de lectura N° 3</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma conciencia del rol de ser estudiante universitario, de la puntualidad y respeto en el desarrollo de las clases.</li> <li>• Demuestra interés en los nuevos conocimientos y respeta la opinión de sus compañeros.</li> <li>• Juzga la importancia del cálculo en su quehacer cotidiano y profesional.</li> <li>• Trabaja individualmente y grupalmente</li> </ul>



## TEMA N° 1: CORRIENTE, RESISTENCIA Y FUERZA ELECTROMOTRIZ

En el desarrollo de este manual hemos ido conociendo fenómenos con los que vivimos continuamente. Hemos abordado, en la unidad anterior, el tema de las cargas eléctricas estáticas y revisado los conceptos relacionados a ellas; ahora, veremos lo que pasa cuando estas cargas se desplazan. Este tema que lo estudiaremos en electrodinámica y conoceremos qué fenómenos origina, qué conceptos se deben manejar y cómo estos han influido en el desarrollo de tecnología que usamos actualmente.

### 1. CORRIENTE ELÉCTRICA

Es el concepto que se emplea para definir la rapidez del flujo carga que pasa por superficie. Algunos autores definen corriente eléctrica como el desplazamiento de carga de un lado a otro (Young & Freedman, 2009; Serway & Jewett, 2005).

La corriente promedio  $I_{prom}$  se define como la cantidad de carga que pasa por un área en un intervalo de tiempo.

$$I_{prom} = \Delta Q / \Delta t$$

“Si la rapidez a la cual fluye la carga varía en el tiempo, entonces la corriente varía en el tiempo y la corriente Instantánea se definiría como límite diferencial de corriente promedio” (Serway, Física, Tomo II, 1995).

$$I = dQ/dt$$

La unidad de corriente es el Ampere (A) = C/s

La intensidad de corriente también puede representarse en función de la velocidad de arrastre deriva ( $v_d$ ), que es la velocidad de los portadores de carga en presencia de un campo eléctrico. En ese caso, queda expresado de la siguiente manera:

$$I_{prom} = \Delta Q / \Delta t = nq v_d A$$

Siendo  $n$  la concentración de partículas con carga por unidad de volumen ( $m^{-3}$ );  $q$ , la carga; y  $A$ , el área.

Nota: Para un conductor la dirección de corriente es opuesta al flujo de electrones.

### 2. DENSIDAD DE CORRIENTE (J)

Definimos densidad de corriente a la corriente por unidad de área, expresándola así:

$$J = I/A = nq v_d$$

Donde  $n$  es la concentración de partículas;  $v_d$  la velocidad de arrastre;  $q$ , la carga; y  $A$ , el área de la sección transversal que atraviesa el flujo. La unidad en S.I. es ampere por metro cuadrado ( $A/m^2$ ).

También se puede definir una densidad de corriente vectorial, cuya dirección la da la velocidad de deriva. La intensidad y el flujo no dependen del signo de la carga.

Si se mantiene una diferencia de potencial en un conductor, se establece una densidad de corriente y campo eléctrico  $E$ . Se debe tener en consideración que si  $V$  es constante, la corriente también lo será.

Existen materiales en los que la densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico. Esta proporcionalidad recibe el nombre de conductividad del conductor ( $\sigma$ ) y se representa como se muestra a continuación:

$$J = \sigma E (*)$$

Dicha relación es muy importante, porque da pie a una ley que veremos más adelante.

### 3. RESISTENCIA ELÉCTRICA

---

Para hablar de resistencia tenemos que definir resistividad ( $\rho$ ) como la razón de las magnitudes del campo eléctrico y la densidad de corriente. Esto significa que a mayor resistividad, mayor será el campo necesario para generar una densidad de corriente.

$$1/\sigma = \rho$$

Un conductor ideal tiene una resistividad igual a cero y un coeficiente de conductividad alto. En este grupo están los metales y aleaciones; en cambio, los aislantes tienen una resistividad que tiende al infinito y un coeficiente de conductividad que tiende a cero la cerámica como, por ejemplo, el caucho y los materiales plásticos. De esto sacamos que el recíproco de la resistividad es la conductividad.

La resistividad de un conductor variará con la temperatura de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

Siendo  $\alpha$  el coeficiente de temperatura de resistividad,  $T$  y  $T_0$ , las temperaturas final e inicial respectivamente.

La resistencia puede ser definida en función de la resistividad de la siguiente manera:

$$R = \rho \cdot L/A$$

Como vemos la resistencia de un material depende de la resistividad del mismo, multiplicado por su longitud dividido entre el área. Sin embargo, la definición más conocida de Resistencia, nos dice que es "la razón entre la diferencia de potencial y la corriente." (Serway, Física, Tomo II, 1995)

$$R = V/I$$

Su unidad es el Ohm y equivalente a V/A si la resistencia no depende de la diferencia de potencial. Entonces, en ese caso, nos encontramos con un conductor que obedece la ley de Ohm.

### 4. LEY DE OHM

---

Esta ley fue desarrollada por George Simon Ohm, quien establece que "en muchos materiales (inclusive la mayor parte de los metales) la relación de la densidad de corriente al campo eléctrico es una constante  $s$  que es independiente del campo eléctrico que produce la corriente" (Serway & Jewett, 2005).

Esta ley es una relación empírica que se aplica a determinados materiales.

Otra forma de definir la ley de Ohm es la siguiente:

$$V = IR$$

Esta ley establece la proporcionalidad directa de  $V$  con respecto a  $I$ ; además, define la resistencia para cualquier conductor, cumpla o no la ley de Ohm, se dirá que esta relación es la ley de Ohm cuando  $R$  es constante.

## 5. FUERZA ELECTROMOTRIZ Y CIRCUITOS

### 5.1. Fuerza electromotriz:

Aunque el nombre no es el más adecuado ya que no es una fuerza, sino una cantidad de energía por unidad de carga, la fuerza electromotriz (f.e.m) es la influencia que hace que la corriente fluya del potencial menor al mayor. Su unidad en el S.I. es el voltio (J/C) y su símbolo es  $\xi$ .

Es necesario que para que un conductor tenga corriente constante este forme una espira cerrada; asimismo, debe estar conectado a una fuente de fem, la cual puede ser una batería, un generador o una celda solar.

La fem ideal es aquella en la que la diferencia de potencial es constante entre sus terminales y es independiente de la corriente que atraviesa el circuito. Esta fem define cuantitativamente la diferencia de potencial.

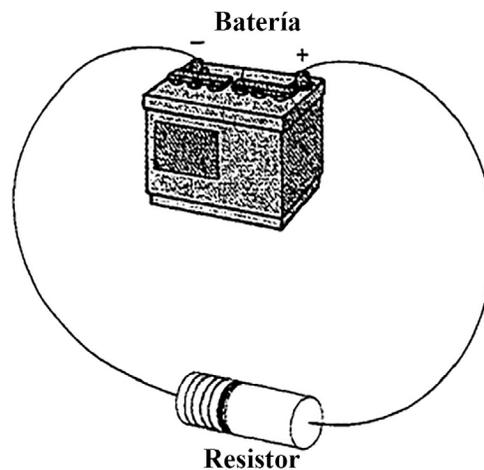


Figura 28. Un resistor conectado a una batería

Fuente: Serway, 1995

En los circuitos que no tienen una fem ideal, existe una resistencia interna que hará variar la diferencia de potencial del circuito.

$$\Delta V = \xi - Ir$$

La fem puede expresarse en función a la ley de Ohm si reemplazamos  $\Delta V$  por  $IR$ ; entonces, tendríamos lo siguiente:  $IR + Ir = \xi$

### 5.2. Circuitos eléctricos:

Definimos un circuito eléctrico como el camino por el que se desplazan las cargas eléctricas. Para poder manejar este tema es necesario conocer las representaciones y simbología, por tanto, tenemos que considerar lo siguiente:

- Los elementos que se conectan a un circuito tienen una resistencia interna despreciable, la diferencia de potencial entre los extremos del alambre de este tipo es cero.
- Si se incluyen medidores ideales, se asume que no interfieren en el circuito.
- Ver la tabla figura 29 para conocer la simbología.

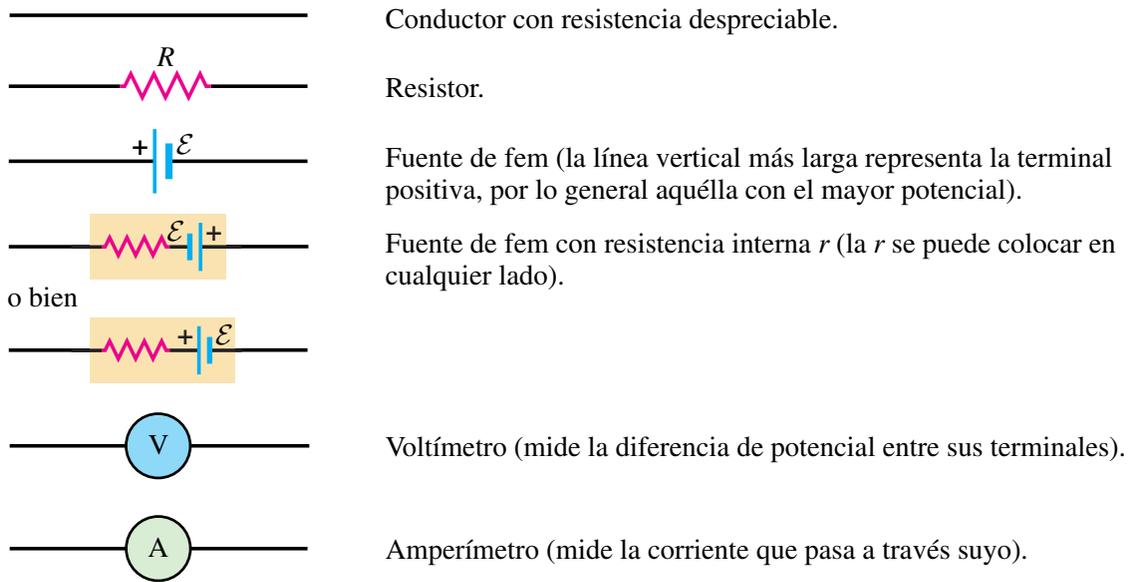


Figura 29. Circuitos eléctricos.  
 Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 860.

### 5.3. Potencia:

“En los circuitos eléctricos es más frecuente que interese la *rapidez* con la que la energía se proporciona a un elemento de circuito o se extrae de él. Si la corriente a través del elemento es  $I$ , entonces en un intervalo de tiempo  $dt$  pasa una cantidad de carga  $dQ = I dt$  a través del elemento. El cambio en la energía potencial para esta cantidad de carga es  $V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$ . Si esta expresión se divide entre  $dt$ , se obtiene la *rapidez* a la que se transfiere la energía hacia fuera o hacia dentro de circuito. La relación de transferencia de energía por unidad de tiempo es la *potencia*, y se denota mediante  $P$ ; por lo tanto, escribimos” (Serway, Física, Tomo II, 1995).

$$P = V_{ab} I$$

Su unidad en el S.I. es el watt, (J/s).



## TEMA N° 2: CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA

Muchos de los artefactos que usamos están conectados mediante cables o integrados en un chip, por lo que es frecuente que en ellos haya circuitos que incluyan varias fuentes, resistores y otros elementos, como capacitores, transformadores y motores, interconectados en una red.

En esta sección, estudiaremos métodos generales para analizar esas redes y cómo calcular voltajes, corrientes y propiedades de elementos de circuito. Aprenderemos a determinar la resistencia equivalente para varios resistores conectados en serie o en paralelo. Para redes más generales necesitamos conocer las dos reglas de Kirchhoff: una se basa en el principio de conservación de la carga, aplicado a una unión o confluencia de dos o más vías; y la otra se deriva de la conservación de la energía para una carga que se desplaza por una espira cerrada. Este acápite se centra en los circuitos de corriente directa (cd), es decir, en los que el sentido de la corriente no cambia con el tiempo.

### 1. RESISTORES EN SERIE Y PARALELO

“Se denomina resistor o bien resistencia al componente electrónico diseñado para introducir una resistencia eléctrica determinada entre dos puntos de un circuito eléctrico” (Diccionario LEXICOON, 2016). Estos dispositivos pueden estar conectados en distintas formas y de acuerdo con su asociación toma sus características.

#### 1.1. Resistores en serie:

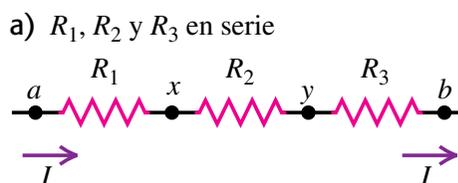


Figura 30. Resistores en serie  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 882

Cuando dos resistores o más están en serie, todas las cargas se mueven a través de un resistor a otro. Las corrientes en los resistores son iguales porque cualquier carga que fluye por  $R_1$ , también debe fluir por  $R_2$  y por  $R_3$ , pero la diferencia de potencial aplicada a través de la combinación en serie de resistores se dividirá entre los resistores.

$$\Delta V = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

La resistencia equivalente es la siguiente:  $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

## 1.2. Resistor en paralelo:

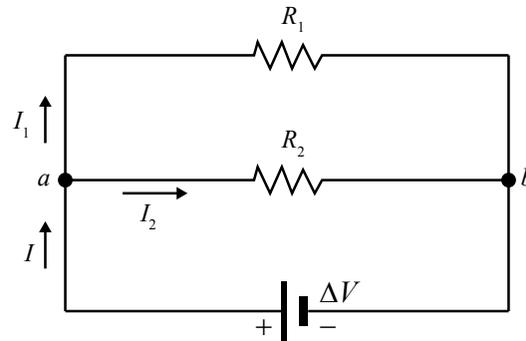


Figura 31. Resistores en paralelo  
Fuente: Serway, 1995

En esta conexión, la intensidad se reparte en dos a partir de la unión ( $I_1$  y  $I_2$ ). Entonces, se deduce lo siguiente:

$$I = I_1 + I_2$$

La diferencia de potencial es la misma a través de las dos resistencias, considerando también lo anterior tenemos este resultado:

$$\Delta V/R = \Delta V/R_1 + \Delta V/R_2 = \Delta V(1/R_1 + 1/R_2)$$

Por tanto, deducimos que la resistencia equivalente para una asociación en paralelo es la siguiente:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

## 2. LEYES DE KIRCHHOFF

Como hemos visto, los circuitos simples se analizan sin complicaciones usando  $\Delta V = IR$ , y las reglas de asociación; sin embargo, para circuitos complicados existen leyes que simplifican su solución y resultan de gran ayuda.

1. La suma de corrientes que entran a cualquier unión en un circuito debe ser igual a la suma de corriente que salen de dicha unión.

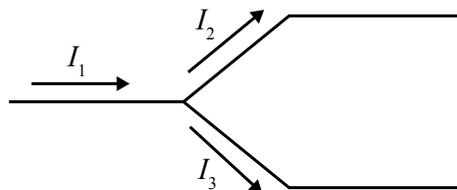


Figura 32. Representación de 1era ley  
Fuente: Serway, 1995

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$\Sigma I_{\text{entra}} = \Sigma I_{\text{sale}}$$

2. La suma de las diferencias de potencial en todos los elementos de la espira debe ser cero.

$$\Sigma \Delta V = 0$$

Esta ley sirve para circuitos donde los campos electromagnéticos no son variables, es decir, se usa para aquellos en los que existe un potencial en cada punto. Para aplicar esta regla se sugiere seguir las siguientes indicaciones:

“- Si se recorre un resistor en dirección de la corriente, el cambio de potencial es  $-IR$ , si el recorrido se hace en dirección opuesta a la corriente el cambio de potencial será  $IR$ ”

“- Si una Fuerza electromotriz se atraviesa de negativo a positivo, el cambio de potencial es positivo  $+\xi$ , si lo hiciese en sentido contrario sería negativo  $-\xi$ ”

También se recomienda al utilizar las reglas de Kirchhoff las pautas que se dan a continuación:

- Realice el diagrama de la malla, identificando los datos conocidos y desconocidos.
- Asigne la dirección de la corriente.
- Utilice la primera regla de Kirchhoff en cada unión, vaya detallando la relación de las corrientes.
- Utilice la segunda regla, a tantas espiras como sea necesario para despejar las incógnitas.
- Resuelva las ecuaciones.

### 3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA

La existencia de la corriente eléctrica y el desarrollo de los aparatos eléctricos y/o electrónicos han hecho necesario e imprescindible el desarrollo y uso de aparatos que permitan monitorear el estado de las instalaciones eléctricas así como los circuitos en los aparatos. A través de estos dispositivos se logra determinar, por ejemplo, la cantidad de voltios que pasa por un circuito y si por este pasa corriente, o si una resistencia está funcionando adecuadamente. A continuación, explicaremos con más detalle dos dispositivos muy útiles en el campo.

#### 3.1. Amperímetro:

Es el dispositivo que mide la corriente. Para lograrlo esta debe pasar directamente por el aparato, lo que significa que este debe ser conectado en serie a los elementos del circuito. Si se quiere medir corrientes directas, debe conectarse de modo que la corriente entre al terminal positivo y salga por el terminal negativo.

Cabe decir que el amperímetro ideal tiene resistencia cero.



Figura 33. Amperímetro

Fuente: Portal de negocios Allbiz. Disponible en <http://bit.ly/2ablrH0>

Actualmente, en el mercado, existen diversos tipos de amperímetros: digitales, analógicos, electromecánicos entre otros.

### 3.2. Voltímetro:

Es un dispositivo que nos permite medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito. Si lo que se quisiera medir sería la diferencia de potencial de un resistor, se mide conectando el voltímetro en paralelo en R.

El voltímetro ideal tiene resistencia infinita y, al igual que el dispositivo anterior, existen digitales, vectoriales y electromecánicos.



Figura 34. Voltímetro

Fuente: Definición. Disponible en <http://bit.ly/2a0gDF2>

### 3.3. El Galvanómetro d'Arsonval:

Está compuesto por una bobina de alambre montada, de modo que pueda girar libremente sobre un pivote en un campo magnético permanente. Este instrumento es el principal componente de los amperímetros y voltímetros análogos, el cual para ser usado como amperímetro ha de ser conectado a una resistencia de desviación en paralelo. También podría ser usado como voltímetro, pero para ello debería ser conectado a una resistencia externa en serie con él.

### 3.4. Ohmetro:

Es un medidor, un resistor y una fuente, conectados en serie. Esta herramienta es una adaptación del galvanómetro d'Arsonval que sirve para medir la resistencia.

### 3.5. Potenciómetro:

“Es un instrumento que se utiliza para medir la fem de una fuente sin extraer corriente de ella, utiliza la compensación de una diferencia potencial desconocida contra una diferencia de potencial ajustable y medible.” (Freedman, 2009,)

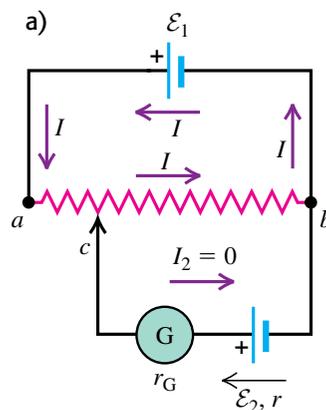


Figura 35. Circuito de un potenciómetro.

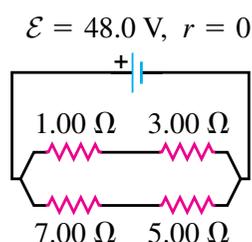
Fuente: Young, 2009, p. 895.



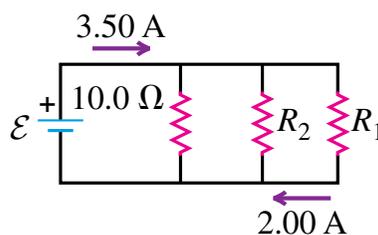
## ACTIVIDAD FORMATIVA N° 5

Resuelve los siguientes ejercicios aplicando los conceptos aprendidos hasta el momento:

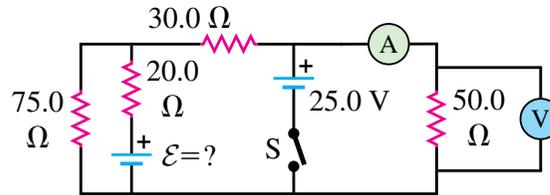
- Un conductor eléctrico diseñado para transportar corrientes grandes tiene una sección transversal circular de 2.50 mm de diámetro y 14.0 m de longitud. La resistencia entre sus extremos es de  $0.104 \Omega$ . Responda a las siguientes preguntas: a) ¿Cuál es la resistividad del material? b) Si la magnitud del campo eléctrico en el conductor es de  $1.28 \text{ V/m}$ , ¿cuál es la corriente total?
- Un alambre de calibre 18 (diámetro de 1.02 mm) transporta una corriente con densidad de  $1.50 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ . Calcule a) la corriente en el alambre y b) la velocidad de deriva de los electrones en el alambre.
- Se necesita producir un conjunto de alambres de cobre cilíndricos de 3.50 m de largo con una resistencia de  $0.125 \Omega$  cada uno. ¿Cuál será la masa de cada alambre?
- Un alambre de oro de 0.84 mm de diámetro conduce una corriente eléctrica. El campo eléctrico en el alambre es de  $0.49 \text{ V/m}$ . ¿Cuáles son a) la corriente que conduce el alambre; b) la diferencia de potencial entre dos puntos del alambre separados por una distancia de 6.4 m; c) la resistencia de un trozo de ese alambre de 6.4 m de longitud?
- Un cable de transmisión de cobre de 100 km de largo y 10.0 cm de diámetro transporta una corriente de 125 A. ¿Cuál es la caída de potencial a través del cable?
- a) Demuestre que cuando dos resistores se conectan en paralelo, la resistencia equivalente de la combinación siempre es menor que la del resistor más pequeño. b) Generalice el resultado del inciso a) para N resistores.
- Calcule la resistencia equivalente de la red de la figura y determine la corriente en cada resistor. La batería tiene una resistencia interna despreciable.



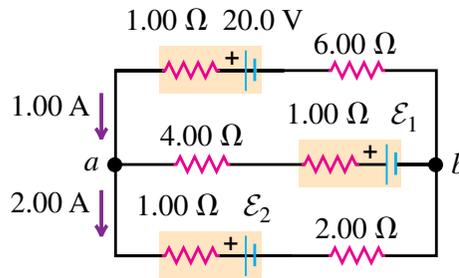
- En el circuito que se muestra en la figura, la tasa a la que  $R_1$  disipa energía eléctrica es 20.0 W. Primero, obtenga  $R_1$  y  $R_2$ ; luego, señale ¿cuál es la fem de la batería?; por último, encuentre la corriente a través tanto de  $R_2$  como del resistor de  $10.0 \Omega$ .



9. En el circuito que se presenta en la figura, las baterías tienen resistencias internas despreciables y los dos medidores son ideales. Con el interruptor S abierto, el voltímetro da una lectura de 15.0 V. Responda a lo siguiente: a) Calcule la femE de la batería. b) ¿Cuál será la lectura del amperímetro cuando se cierre el interruptor?



10. Encuentre la fem1 y fem2 en el circuito de la figura y obtenga la diferencia de potencial del punto b con respecto del punto a.



## TEMA N° 3: CAMPO MAGNÉTICO Y FUERZAS MAGNÉTICAS

### 1. MAGNETISMO

Es un fenómeno físico por el cual los objetos ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. Hay algunos materiales conocidos que han presentado propiedades magnéticas detectables fácilmente como el níquel y el cobre, los que comúnmente se llaman imanes y ante su presencia se genera un campo magnético.

### 2. CAMPO MAGNÉTICO

El campo magnético se define como el campo de acción en el que aparece una fuerza sobre cualquier carga o corriente en movimiento presente en este espacio. Es un campo vectorial representado por  $B$  en el que, como hemos dicho, actúa una fuerza magnética que tendrá una magnitud que es proporcional a la carga  $q$ , la magnitud  $B$ , a la rapidez  $v$  de la partícula. La unidad en el S.I. es el Tesla (T).

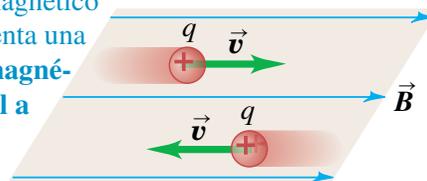
Cuando esta fuerza actúa sobre cargas móviles, su magnitud es proporcional a la magnitud de la carga y a la magnitud de la intensidad de campo. Además, dependiendo de la velocidad de la partícula, su dirección es perpendicular al campo magnético y a la velocidad, por lo que se puede definir de la siguiente forma:

$$F = |q| B v \sin \Phi$$

Y se presentan en estas tres situaciones:

a)

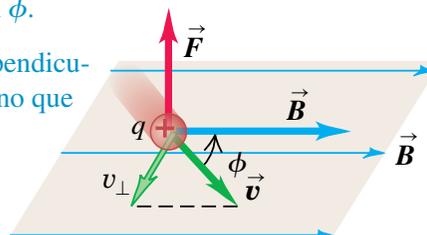
Una carga que se mueve en forma **paralela** al campo magnético experimenta una **fuerza magnética igual a cero**.



b)

Una carga que se mueva con un ángulo  $\phi$  con respecto a un campo magnético experimenta una fuerza magnética con magnitud  $F = |q| v_{\perp} B = |q| v B \sin \phi$ .

$\vec{F}$  es perpendicular al plano que contiene  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$ .



c)

Una carga que se mueva de manera perpendicular a un campo magnético experimenta una fuerza magnética máxima con magnitud  $F_{\text{máx}} = qvB$ .

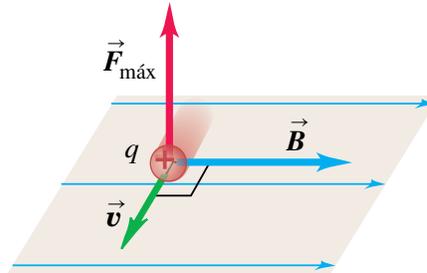


Figura 36. Casos de fuerza magnética  
Fuente: Young, 2009, p. 919

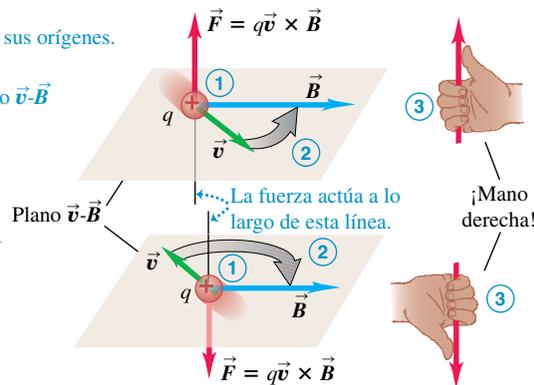
Para determinar la dirección de esta fuerza se aplica la regla de la mano derecha como veremos en el siguiente esquema:

**Regla de la mano derecha** para la dirección de la fuerza magnética sobre una carga **positiva** que se mueve en un campo magnético:

① Coloque los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  unidos en sus orígenes.

② Imagine que gira  $\vec{v}$  hacia  $\vec{B}$  en el plano  $\vec{v}$ - $\vec{B}$  (en el menor ángulo).

③ La fuerza actúa a lo largo de una línea perpendicular al plano  $\vec{v}$ - $\vec{B}$ . Enrolle los dedos de su mano derecha en torno a esta línea en la misma dirección que giró a  $\vec{v}$ . Ahora, su pulgar apunta en la dirección que actúa la fuerza.



**Si la carga es negativa**, la dirección de la fuerza es **opuesta** a la que da la regla de la mano derecha.

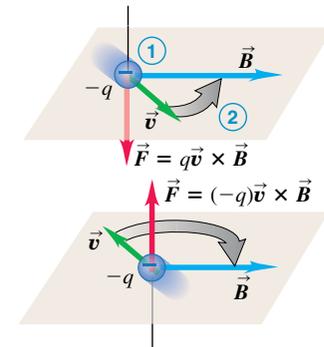


Figura 37. Procedimiento de la regla de la mano derecha.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 920.

### 3. LÍNEAS DE CAMPO Y FLUJO MAGNÉTICO

#### 3.1. Líneas de campo:

Son representaciones del campo magnético, las cuales se dibujan de modo que la línea que pasa a través de cualquier punto sea tangente al vector del campo magnético en ese punto. Estas líneas también se denominan de inducción magnética, no se cortan y circulan de norte a sur en el imán; además, no son líneas de fuerza, pues no apuntan en dirección de la fuerza que se ejerce sobre la carga. Cabe decir que las líneas de campo dependen de la forma del imán.

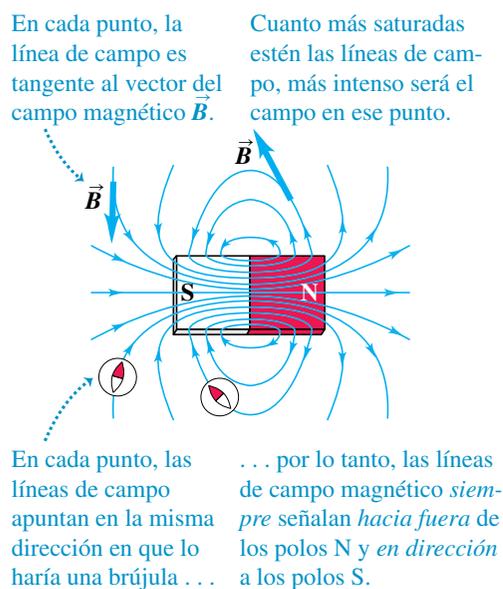


Figura 38. Líneas de campo de un imán permanente.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 922.

### 3.2. Flujo magnético ( $\Phi_B$ ):

“Es una magnitud escalar que determina la cantidad de líneas de campo magnético que pasan a través de una superficie.” (Ramos, 2010)

Si el área la definimos como  $dA$  y la componente normal del campo magnético  $B \cos \phi$ , siendo  $\phi$  el ángulo entre  $B$  y la perpendicular al área, podemos definir  $d\Phi_B$  de la siguiente manera:

$$d\Phi_B = B_{\perp} dA = B \cos \phi dA = \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

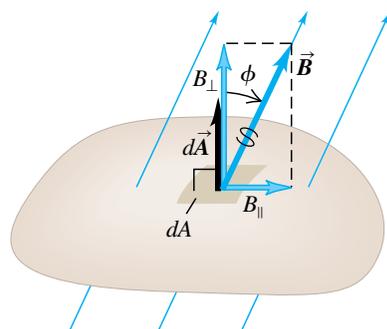


Figura 10. Flujo Magnético a través de un área.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 924.

El flujo total será la suma de las componentes individuales así como se aprecia a continuación:

$$\Phi_B = \int B_{\perp} dA = \int B \cos \phi dA = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{flujo magnético a través de una superficie})$$

En el caso de que el campo magnético sea uniforme en el área  $A$ ,  $B$  y  $\Phi$  son los mismos en toda la superficie se puede decir que:

$$\Phi B = AB \cos \Phi$$

En el S.I., la unidad de flujo magnético es el weber ( $T.m^2$ )

Nota: El flujo magnético en una superficie cerrada es cero.

#### 4. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CON CARGA EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Cuando una partícula cargada se mueve en un campo magnético, sobre ella actúa la fuerza magnética dada por  $F = qvB$  y su movimiento está determinado por las leyes de Newton. La fuerza magnética nunca tiene una componente paralela al movimiento de la partícula, de modo que dicha fuerza nunca realiza *trabajo* sobre la partícula. Esto se cumple aun si el campo magnético no es uniforme.

“El movimiento de una partícula cargada bajo la sola influencia de un campo magnético siempre ocurre con rapidez constante” (Young & Freedman, 2009, p. 926).

En el gráfico inferior, donde se muestra a una partícula desplazándose en un campo magnético, se observa que la trayectoria es un círculo y que la partícula se mueve a velocidad constante por lo que se puede deducir que la única aceleración que existe es la centrípeta; entonces, aplicando la ley de Newton, podemos decir lo siguiente:

$$F = |q|vB = m \frac{v^2}{R}$$

Donde  $m$  es la masa de la partícula y  $R$  el radio de la trayectoria circular.

Una carga que se mueve con ángulos rectos con respecto a un campo  $\vec{B}$  uniforme se mueve en círculo a rapidez constante, porque  $\vec{F}$  y  $\vec{v}$  siempre son perpendiculares entre sí.

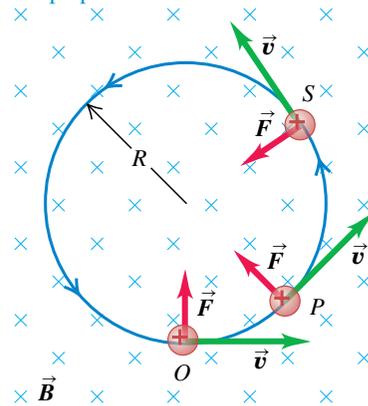


Figura 39. Movimiento de una partícula.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 926.

Si reemplazamos  $v = R\omega$ , en la expresión de arriba, podemos relacionar la velocidad con la velocidad angular. En ese caso tenemos lo siguiente:

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m}$$

Siendo  $\omega$  la velocidad angular.

## 5. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN CONDUCTOR QUE TRANSPORTA CORRIENTE

Las fuerzas magnéticas sobre las cargas en movimiento en el interior del conductor se transmiten al material del conductor, el cual en conjunto experimenta una fuerza distribuida en toda su longitud. Se puede calcular la fuerza sobre un conductor que transporta corriente empezando con la fuerza magnética  $F=q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  sobre una sola carga en movimiento.

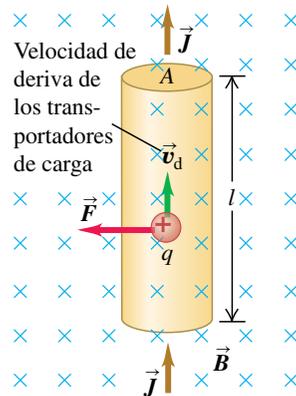


Figura 40. Partícula en movimiento con velocidad a la deriva  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 932.

Si el número de cargas por unidad de volumen es  $n$ , un segmento de conductor con longitud  $l$  tiene un volumen  $Al$  y contiene un número de cargas igual a  $nAl$ . La fuerza total sobre todas las cargas en movimiento en este segmento tiene una magnitud que equivale a la siguiente expresión:

$$F = (nAl)(qv_d B) = (nqv_d A)(lB)$$

Recordemos que densidad de corriente ( $J$ ) es  $nqv_d$ ; asimismo,  $JA$  es intensidad por lo que la expresión quedaría así:

$$F = Il \times B$$

Si el campo magnético no es perpendicular al conductor, entonces consideraríamos lo siguiente:

$$F = Il \times B \sin \Phi$$

En el caso de un conductor que no es recto, sería necesario dividirlo en pequeñas partículas; por tanto, nuestra expresión infinitesimal quedaría como se aprecia a continuación:

$$dF = IdL \times B$$

Finalmente, la fuerza total sería la integral a lo largo de todo el alambre de esta expresión.

## 6. FUERZA Y MOMENTO DE TORSIÓN EN UNA ESPIRA DE CORRIENTE

Si analizamos una espira rectangular de corriente en un campo magnético uniforme, la espira se puede representar como una serie de segmentos rectilíneos.

Veremos que la fuerza total sobre la espira es igual a cero, pero puede haber un par de torsión neto que actúe sobre la espira, con algunas propiedades interesantes, que observaremos en la siguiente figura:

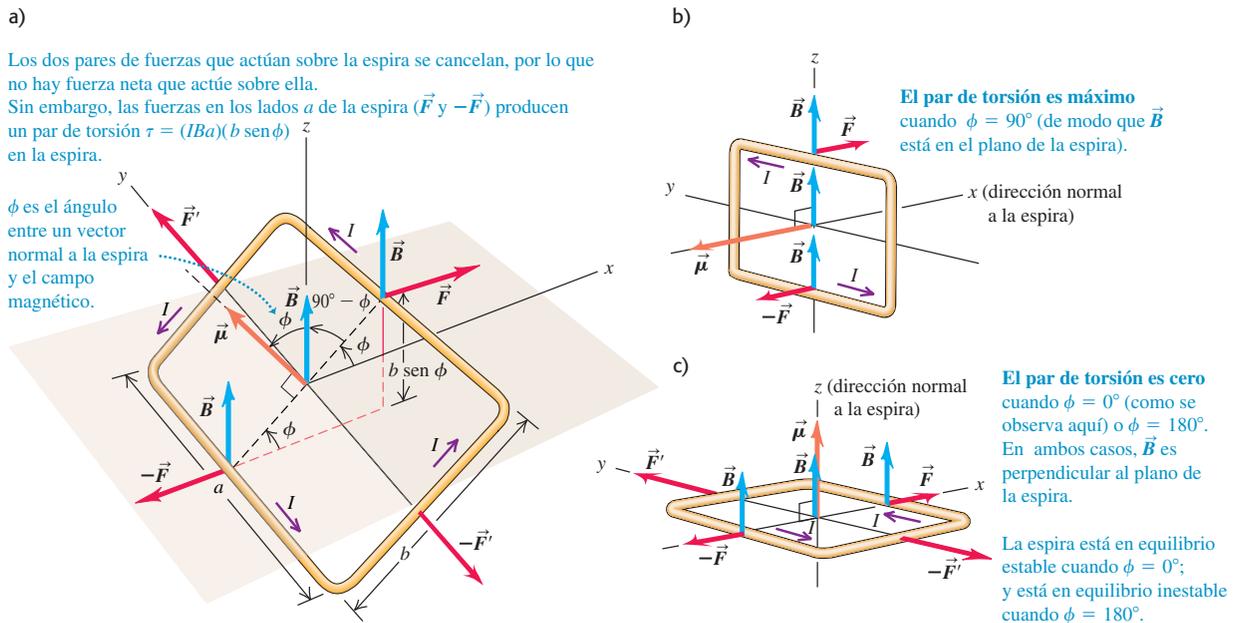


Figura 41. Par de torsión y fuerza en una espira  
Fuente: Young & Freedman, 2009 p. 936

“La fuerza total en la espira es igual a cero porque las fuerzas en lados opuestos se cancelan por pares. La fuerza neta sobre una espira de corriente en un campo magnético uniforme es igual a cero. Sin embargo, el par de torsión neto en general no es igual a cero” (Young & Freedman, 2009, p. 936).

Las dos fuerzas  $F$  y  $-F$  quedan a lo largo de distintas líneas de acción y cada una origina un par de torsión con respecto al eje  $y$ . Según la regla de la mano derecha, para determinar la dirección de los pares de torsión, los pares de torsión vectoriales debidos a  $F$  y a  $-F$  están, ambos, en la dirección  $+y$ ; de ahí que el par de torsión vectorial neto también esté en la dirección  $+y$ . El brazo de momento para cada una de estas fuerzas (igual a la distancia perpendicular desde el eje de rotación hasta la línea de acción de la fuerza) es  $(b/2) \sin\phi$ , así que el par de torsión debido a cada fuerza tiene magnitud  $F(b/2) \sin\phi$ . La magnitud del par de torsión neto es la siguiente:

$$\tau = 2F(b/2)\sin\phi = (Iba)(b\sin\phi)$$

Si llamamos  $A$  al producto  $a \cdot b$ , entonces la expresión quedaría así:

$$\tau = IAB\sin\phi$$

## 7. EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

Es una máquina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica utilizando un par de torsión magnético, el cual actúa sobre un conductor que transporta corriente.

Veamos el siguiente esquema de un motor sencillo de cc, extraído del libro *Física universitaria*:

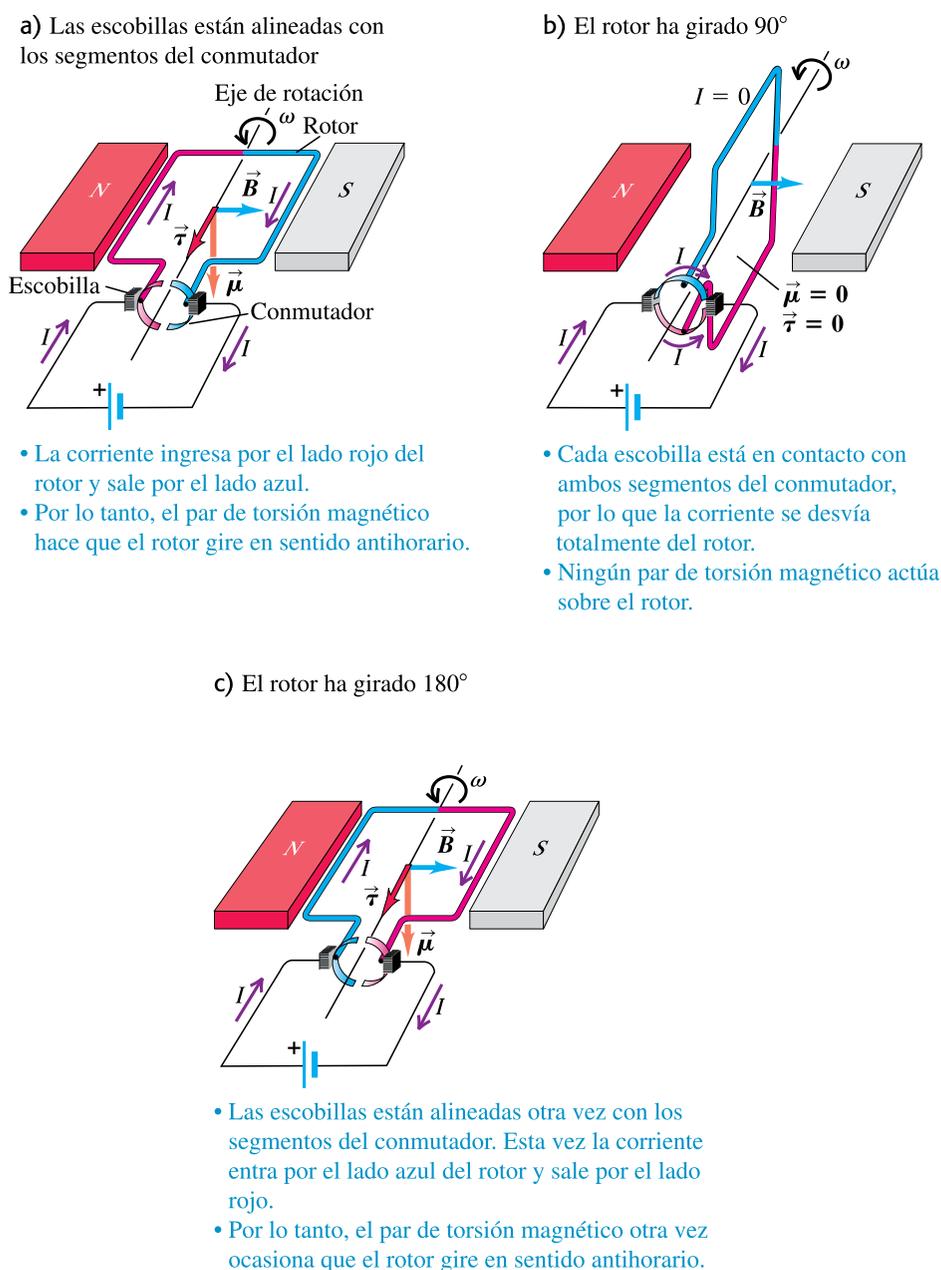


Figura 42. Esquema de un motor sencillo de c.c.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 941.

La parte móvil del motor es el *rotor*, es decir, el tramo de alambre cuya forma es una espira de extremos abiertos y tiene libertad para girar alrededor de un eje. Los extremos de los alambres del rotor están adheridos a segmentos circulares conductores que forman un *conmutador*. En la figura a, cada uno de los dos segmentos del conmutador hacen contacto con una de las terminales o escobillas de un circuito externo que incluye una fuente de fem. Esto ocasiona que una corriente fluya hacia el rotor por un lado (en color rojo) y salga del rotor por el otro lado (en azul). El rotor es una espira de corriente con momento magnético  $\vec{u}$  que queda entre los polos opuestos de un imán permanente, por lo que hay un campo magnético  $\vec{B}$  que ejerce un par de torsión  $\vec{\tau} = \vec{u} \times \vec{B}$  sobre el rotor.

En la figura b, el rotor ha girado 90 grados. En ese caso, si la corriente a través del rotor fuera constante, este se hallaría ahora en su orientación de equilibrio; simplemente oscilaría en torno de esta orientación, con lo cual cada escobilla ahora está en contacto con los *dos* segmentos del conmutador. No hay diferencia de potencial entre los conmutadores, así que en este instante no fluye corriente por el rotor y el momento magnético es igual a cero.

En la figura c, la corriente entra por el lado azul y sale por el rojo. En este caso, la corriente se ha invertido, el rotor ha girado 180 grados y el par de torsión hace que gire en sentido antihorario.



## TEMA N° 4: FUENTES DE CAMPO MAGNÉTICO

Hemos visto que ante la presencia de un campo magnético solo este ejerce una fuerza cuando hay cargas en movimiento y que, generalmente, son los imanes permanentes los que generan un campo magnético. Ahora, en este apartado, veremos otras fuentes de campo magnético.

### 1. CAMPO MAGNÉTICO DE UNA CARGA EN MOVIMIENTO, DE UN ELEMENTO DE CORRIENTE Y DE UN CONDUCTOR RECTO QUE TRANSPORTA CORRIENTE

Hemos visto que ante la presencia de un campo magnético solo este ejerce una fuerza cuando hay cargas en movimiento, y que generalmente son los imanes permanentes los que generan un campo magnético, a través de este tema veremos otras fuentes de campo magnético:

#### 1.1. Campo magnético de una carga en movimiento:

Para entender lo que pasaría en un alambre conductor es necesario comprender qué pasa con una carga en movimiento. Al inicio de la unidad, habíamos mencionado que en un campo magnético solo aparece una fuerza cuando existe una partícula en movimiento. El campo magnético y el eléctrico tienen muchas semejanzas, pero también diferencias; los estudios realizados han demostrado que al igual que en el campo eléctrico el campo magnético es proporcional a la carga e inversamente proporcional a la distancia, considerando la presencia de una ubicación inicial o punto fuente y de otra que es la distancia a la que vamos a tomar el valor del campo. Asimismo, tenemos en cuenta que esta carga se mueve a una velocidad constante.

Cabe decir que la diferencia fundamental entre estos dos campos es que la dirección de B no es a lo largo de la línea que va del punto de fuente al punto de campo. En vez de ello, es perpendicular al plano que contiene esta línea y al vector velocidad, de la partícula, lo que significa además que depende de la velocidad de la partícula y del seno del ángulo  $\Phi$ . Así, podemos definir B de la siguiente forma:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|q|v\text{sen}\phi}{r^2}$$

Siendo  $\mu_0/4\pi$  una constante de proporcionalidad, ya que el valor de  $\mu_0$  es el que se muestra a continuación:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Tm/A}$$

Incorporando la dirección a la magnitud del campo, tendríamos esto:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^2} \quad (\text{campo magnético de una carga puntual con velocidad constante})$$

La presencia de una carga en movimiento en un campo magnético también genera un campo eléctrico, con líneas de campo hacia afuera si fuera una carga positiva. El campo magnético de esta carga, sin embargo, sería alrededor de la dirección v. Para ello, se ha tomado el vector v como centro y se ha aplicado la regla de la mano derecha para esta partícula.

## 1.2. Campo magnético de un elemento de corriente:

Al igual que el campo eléctrico, el campo magnético obedece al principio de superposición de campos, así para varias cargas en movimiento el campo magnético total sería la suma vectorial de los campos individuales de cada carga.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin\phi}{r^2}$$

Definiéndolo en forma vectorial, tendríamos lo siguiente:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (\text{campo magnético de un elemento de corriente})$$

Estas dos últimas expresiones son conocidas como la ley de Biot Savart que se utiliza para encontrar el campo magnético total debido a la corriente en un circuito completo en cualquier punto en el espacio.

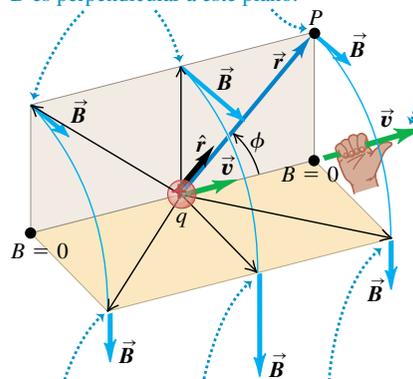
Para segmentos  $dl$  podemos definir  $B$  de esta manera:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Las líneas de campo en este caso son círculos en planos perpendiculares a  $dl$  y con centro en la línea de  $dl$ . Sus direcciones están dadas por la misma regla de la mano derecha para cargas puntuales.

**Regla de la mano derecha para el campo magnético debido a una carga positiva que se mueve a velocidad constante:** Apunte el pulgar de su mano derecha en dirección de la velocidad. Ahora sus dedos se cierran alrededor de la carga en dirección de las líneas del campo magnético. (Si la carga es negativa, las líneas del campo van en sentido opuesto.)

Para estos puntos de campo,  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$  quedan en el plano color beige, y  $\vec{B}$  es perpendicular a este plano.



Para estas líneas de campo,  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$  quedan en el plano color dorado, y  $\vec{B}$  es perpendicular a este plano.

Figura 43. Campo magnético en un elemento de corriente  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 958.

### 1.3. Conductor recto que transporta corriente:

El campo magnético producido por un conductor recto puede ser obtenido con la ley de Biot Savat, vista anteriormente, esto es útil porque alambres rectos son usados en aparatos eléctricos y electrónicos. Para un conductor rectilíneo de longitud  $2a$ , como el de la figura, podemos definir el campo magnético como se aprecia a continuación:

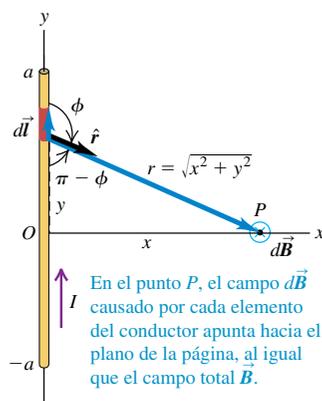


Figura 15: Conductor rectilíneo de longitud  $2a$

Fuente: Young & Freedman, 2009 pp. 963.

de la siguiente manera:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{x dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

Cuando  $a$  tiene al infinito se convertiría:

$$B = \mu_0 I / 2\pi x$$

Siendo  $x$  la distancia entre campo eléctrico y el conductor infinito.

## 2. FUERZA ENTRE CONDUCTORES PARALELOS

Una corriente en un conductor crea un campo magnético; en dos conductores, cada uno de ellos creará un campo magnético que genere fuerzas magnéticas de uno sobre el otro. Como hemos visto en el acápite anterior, el campo magnético en un conductor infinito está dado por la siguiente expresión:

$$B = \mu_0 I / 2\pi d$$

También revisamos anteriormente que en un conductor existe una fuerza magnética igual que se representa así:

$$F = IL \times B$$

Si se reemplaza esta expresión podríamos decir que el valor de  $F$  es el siguiente:

$$F = I I' L \mu_0 / 2\pi d$$

Siendo  $d$  la distancia entre los conductores e  $I, I'$  la intensidad en cada conductor.

Ahora bien, si la corriente en los dos conductores es en el mismo sentido, los conductores se atraen. En cambio, si el sentido es distinto, se repelen.

Si los conductores transportaran corrientes en sentidos *opuestos*, se *repelerían* uno al otro.

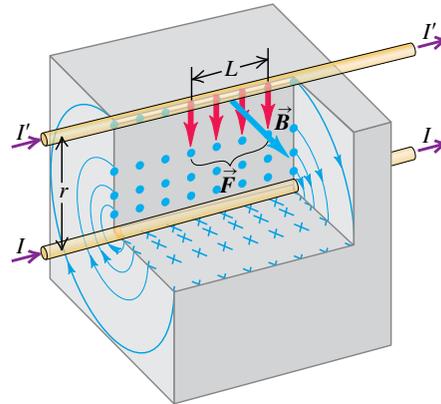


Figura 44. Fuerza magnética en dos conductores.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 966.

### 3. CAMPO MAGNÉTICO DE UNA ESPIRA CIRCULAR DE CORRIENTE

El uso de bobinas en electroimanes y en transformadores que son atravesados por corrientes generando campos magnéticos es muy común. En este acápite, veremos el campo magnético tanto en el centro como a una distancia del mismo. Para ello, vamos a recordar la ley de Biot Savat, lo consideraremos primero en una espira para luego generalizarlo en la bobina completa como se aprecia a continuación:

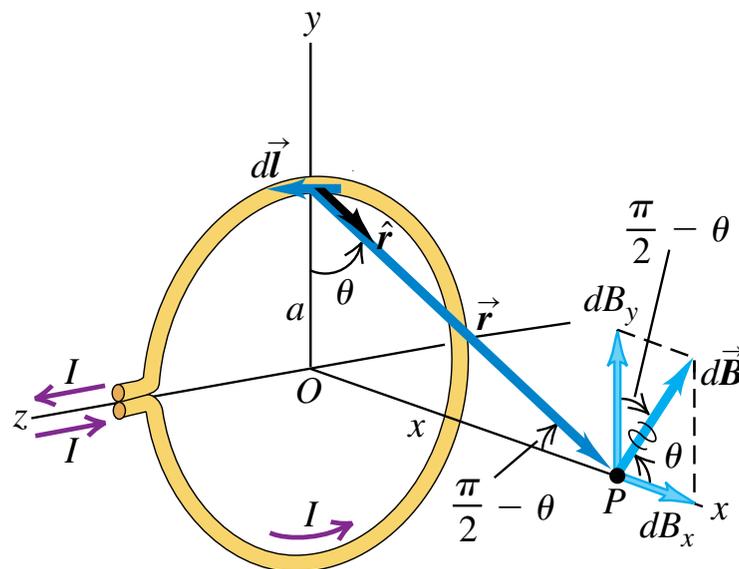


Figura 45. Espira circular de una bobina.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 967

La figura tiene simetría rotacional con respecto al eje  $x$ , por lo que no puede haber una componente del campo total  $B$  perpendicular a este eje. Para cada elemento  $d\vec{l}$  hay otro elemento correspondiente en el lado opuesto de la espira, con dirección opuesta. Estos dos elementos hacen contribuciones iguales a la componente  $x$  de  $d\vec{B}$ , pero dan componentes *opuestas* perpendiculares al eje  $x$ . Así, todas las componentes perpendiculares se can-

celan y solo sobreviven las componentes  $x$ , de modo que el campo magnético en  $x$  estaría dado de la siguiente manera:

$$B_x = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a \, dl}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I a}{4\pi(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dl$$

Como la integral de  $dl$  es una circunferencia de longitud  $2\pi a$ , entonces:

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{sobre el eje de una espira circular})$$

Para  $N$  espiras de una bobina, tendríamos lo siguiente:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{sobre el eje de } N \text{ espiras circulares})$$

Si queremos analizar el campo en el centro de la espira  $x=0$ , por que:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2a} \quad (\text{en el centro de } N \text{ espiras circulares})$$

#### 4. LEY DE AMPERE Y SUS APLICACIONES

Esta ley describe la creación de campos magnéticos y es especialmente útil para calcular aquellos que tengan gran simetría. Se define como "La integral de línea  $B \cdot ds$  alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a  $\mu_0 I$ , donde  $I$  es la corriente continua total que pasa por cualquier superficie delimitada por la trayectoria cerrada." (Serway, Física, Tomo II, 1995)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$$

A través de esta ley también podemos determinar el campo magnético dentro de un toroide y un solenoide de  $n$  vueltas como se puede apreciar a continuación:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} \quad (\text{toroide})$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I \quad (\text{solenoides})$$

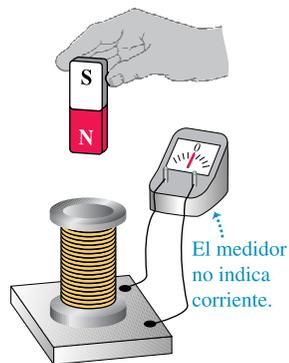


## TEMA N° 5: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

### 1. EXPERIMENTO DE INDUCCIÓN

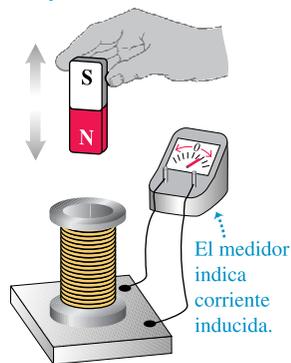
La inducción electromagnética consiste en que si el flujo magnético de un circuito cambia, este puede generar una fem y una corriente en el circuito. Este fenómeno fue observado por Michael Faraday y Joseph Henry en 1830, quienes notaron que cuando se desplaza un imán por una bobina, se genera una corriente y una fem. Además, lo mismo pasa si se desplaza la bobina por un imán, como se visualiza en la siguiente imagen.

a) Un imán fijo NO induce una corriente en una bobina.

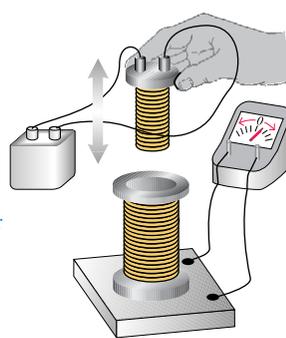


Todas estas acciones SÍ inducen una corriente en la bobina. ¿Qué tienen en común?\*

b) Mover el imán acercándolo o alejándolo de la bobina.



c) Mover una segunda bobina que conduce corriente, acercándola o alejándola de la primera.



d) Variar la corriente en la segunda bobina (cerrando o abriendo el interruptor).



\*Provocan que el campo magnético a través de la bobina cambie.

Figura 46. Formas de inducir fem en movimiento.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 994.

Nótese que solo se genera la fem durante el movimiento.

A continuación, se señalan algunas observaciones sobre este experimento:

1. Cuando no hay corriente en el electroimán, el galvanómetro no indica corriente.
2. Cuando el electroimán se enciende, hay una corriente momentánea a través del medidor a medida que se incrementa.
3. Cuando se nivela en un valor estable, la corriente cae a cero sin importar qué tan grande sea.
4. Con la bobina en un plano horizontal, comprimimos esta para reducir el área de su sección transversal. El medidor detecta corriente solo durante la deformación, no antes ni después. Cuando aumentamos el área para que la bobina regrese a su forma original, hay corriente en sentido opuesto, pero solo mientras el área de la bobina está cambiando.
5. Si se hace girar la bobina algunos grados en torno a un eje horizontal, el medidor detecta corriente durante la rotación en el mismo sentido que cuando se redujo el área. Cuando se hace girar de regreso la bobina, hay una corriente en sentido opuesto durante esta rotación.
6. Si se saca la bobina bruscamente del campo magnético, hay corriente durante el movimiento en el mismo sentido que cuando se redujo el área.

## 2. LEY DE FARADAY

Para referirnos a la ley de Faraday tenemos que recordar el concepto de flujo magnético a través del diferencial de área. Para ello observemos la fórmula que se muestra a continuación:

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = B dA \cos\phi$$

Entonces, el flujo magnético total a través del área infinita es la siguiente:

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

Si B es uniforme sobre un área plana tendríamos lo siguiente:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos\phi$$

Así la ley de Faraday de la inducción establece que “la fem inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del flujo magnético a través de la espira con respecto al tiempo”. En símbolos, la ley de Faraday se representa así:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{ley de Faraday de la inducción})$$

Si el circuito consta de N espiras,  $\mathcal{E}$  quedaría expresada de esta manera:

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

Cabe decir que entre los aparatos utilizados por esta ley tenemos al interruptor de falla a tierra, que es un dispositivo de seguridad que impide los choques eléctricos.

## 3. LEY DE LENZ

Esta ley, desarrollada por el alemán Heirinch Lenz, establece lo siguiente:

“El sentido de la corriente producida por la fem inducida es tal que el campo que ella crea tiende a compensar la variación del flujo a través del circuito, dicho de otra manera, el campo magnético inducido se opone a la variación del flujo del campo magnético externo” (Ramos, 2010).

Sobre la dirección de las corrientes inducidas se pueden clasificar flujos crecientes y decrecientes hacia arriba o abajo tal como se aprecia en la imagen:

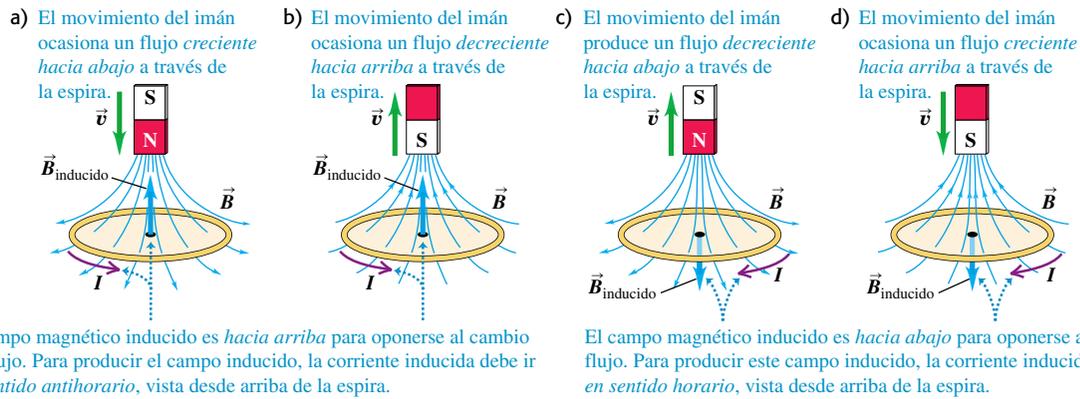


Figura 47. Ley de Lenz.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1005

#### 4. FUERZA ELECTROMIZ DE MOVIMIENTO

Para un conductor sea cualquiera la forma en que se mueva en un campo magnético, uniforme o no (suponiendo que el campo magnético en cada punto no varía con el tiempo), se aplicará el concepto de fem de movimiento. Para un elemento del conductor la contribución  $d\mathcal{E}$  a la fem es la magnitud  $dl$  multiplicada por la componente  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  (la fuerza magnética por unidad de carga) paralela a  $d\mathbf{l}$ . Su representación sería como se muestra a continuación:

$$d\mathcal{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

Para cualquier espira conductora cerrada, la fem total es la siguiente:

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (\text{fem de movimiento: espira conductora cerrada})$$

Además, analicemos un caso particular, que se expone en el texto de Física Universitaria de Young & Freedman. Primero, observemos la siguiente imagen:

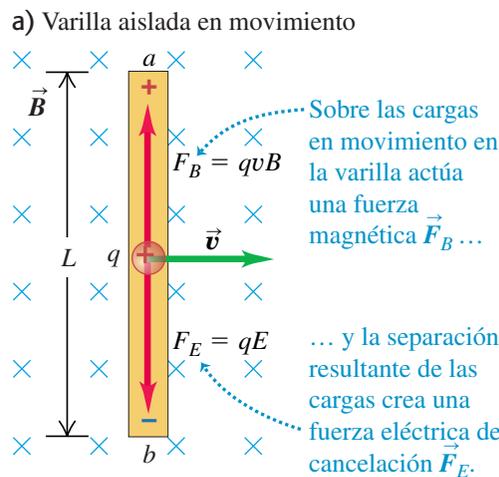


Figura 48. Campo magnético en una varilla en movimiento

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1006

En este caso, se muestra una varilla móvil separada del conductor, el campo magnético es uniforme y dirigido hacia la página; por tanto, la partícula cargada  $q$  en la varilla experimenta una fuerza magnética  $F=qv \times B$  con magnitud  $F=|q|vB$ . Para este ejemplo se asume que  $q$  es positivo, es decir, el sentido de la fuerza es hacia arriba a lo largo de la varilla de  $b$  a  $a$ . Esta fuerza magnética ocasiona que las cargas libres se muevan generando un exceso de carga positiva en el extremo superior  $a$  y de carga negativa en el inferior, creándose así un campo eléctrico en el interior de la varilla de  $a$  a  $b$ . De esta manera, se puede decir que  $qE=qvB$ .

Además, la magnitud de  $V_{ab}=V_a-V_b= \mathcal{E}$ . Por lo tanto,  $V_{ab}= \mathcal{E}=vBL$

## 5. CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS

Cuando un conductor se mueve en un campo magnético, la fem inducida se entiende en términos de fuerzas magnéticas que actúan sobre las cargas del conductor. La existencia de este campo puede generar un campo eléctrico inducido, causado por el flujo magnético cambiante, con características distintas como cuando una carga  $q$  completa una vuelta alrededor de la espira, el trabajo total realizado sobre ella por el campo eléctrico debe ser igual al producto de  $q$  por la fem  $\mathcal{E}$ . Es decir, el campo eléctrico en la espira no es conservativo, y no está ligado a un potencial. La integral de línea, que representa el trabajo realizado por el campo inducido por unidad de carga, es igual a la fem inducida  $\mathcal{E}$  que se expresa a continuación:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}$$

Para este caso la ley de Faraday se expresa lo siguiente:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{trayectoria de integración constante})$$

Esta expresión es válida cuando la trayectoria alrededor se integra y es constante.



### LECTURA SELECCIONADA N.º 3: MATERIALES MAGNÉTICOS HOY: ¿IMANES DE ÁTOMOS AISLADOS?

Leer el capítulo IV. Materiales magnéticos hoy: ¿imanes de átomos aislados? pp. 41-46

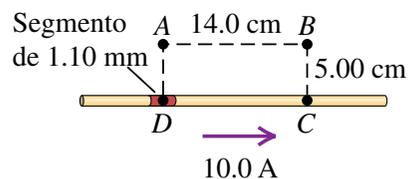
Hernando. (2007). *Materiales magnéticos hoy: ¿imanes de átomos aislados?* En C. Mijangos & J. Moya (Eds.), *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI* (pp. 41–52). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Disponible en <http://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/documentos/materiales.pdf>



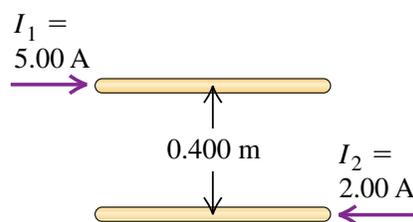
## ACTIVIDAD FORMATIVA N° 6

Resuelva los siguientes ejercicios y problemas aplicando lo aprendido

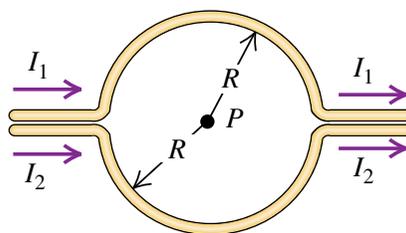
- Una carga puntual de  $16.00 \mu\text{C}$  se desplaza con rapidez constante de  $8.00 \times 10^6 \text{ m/s}$  en la dirección  $1y$  con res referencia. En el instante en que la carga puntual está en el origen de este marco de referencia, ¿cuál es el vector del campo magnético que produce en los siguientes puntos: a)  $x = 0.500 \text{ m}$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ; b)  $x = 0$ ,  $y = -0.500 \text{ m}$ ,  $z = 0$ ; c)  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = +0.500 \text{ m}$ ; d)  $x = 0$ ,  $y = -0.500 \text{ m}$ ,  $z = +0.500 \text{ m}$ ?
- Un alambre recto transporta una corriente de  $10.0 \text{ A}$ . ABCD es un rectángulo con su punto D a la mitad de un segmento de  $1.10 \text{ mm}$  del alambre, y su punto C está en el alambre. Calcule la magnitud y dirección del campo magnético debido a este segmento en los siguientes puntos: a) el punto A; b) el punto B; c) el punto C.



- Dos alambres largos y paralelos están separados por una distancia de  $0.400 \text{ m}$ . Las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  tienen las direcciones que se indica en la imagen. a) Calcule la magnitud de la fuerza ejercida por cada alambre sobre un tramo de  $1.20 \text{ m}$  del otro. ¿La fuerza es de atracción o de repulsión? b) Cada corriente se duplica, de manera que  $I_1$  es ahora de  $10.0 \text{ A}$  e  $I_2$  de  $4.00 \text{ A}$ . En esas condiciones, ¿cuál es la magnitud de la fuerza que cada alambre ejerce sobre un tramo de  $1.20 \text{ m}$  del otro?



- Calcule la magnitud del campo magnético en el punto P de la figura en términos de  $R$ ,  $I_1$  e  $I_2$ . ¿Qué resultado da su expresión cuando  $I_1 = I_2$ ?



- Un solenoide de  $15.0 \text{ cm}$  de largo con radio de  $2.50 \text{ cm}$  tiene un devanado compacto con  $600$  espiras de alambre. La corriente en el devanado es de  $8.00 \text{ A}$ . Calcule el campo magnético en un punto cercano al centro del solenoide.

6. Un electrón experimenta una fuerza magnética, cuya magnitud es de  $4.60 \times 10^{-15}$  N cuando se mueve con un ángulo de  $60.0^\circ$  con respecto a un campo magnético de magnitud  $3.50 \times 10^{-3}$  T. Encuentre la rapidez del electrón.
7. Un área circular con radio de 6.50 cm yace en el plano xy. ¿Cuál es la magnitud del flujo magnético a través de este círculo, debido a un campo magnético uniforme  $B = 0.230$  T, a) en la dirección +z; y b) a un ángulo de  $53.1^\circ$  a partir de la dirección +z.
8. Una bobina consta de 200 vueltas de alambre y tiene una resistencia total de  $2\Omega$ . Cada vuelta es un cuadrado de 18 cm de lado y se activa un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la bobina. Si el campo cambia linealmente de 0 a 0,5 T en 0,8s, ¿cuál es la fem inducida en la bobina mientras está cambiando el campo?



## GLOSARIO DE LA UNIDAD III

---

### A

#### ANISÓTROPO

Un material es anisótropo cuando sus propiedades dependen de la orientación según la cual se hace la medición de ellas.

### E

#### EFECTO JAHN-TELLER

El efecto Jahn-Teller se asocia a la deformación de los poliedros de coordinación. Este teorema propone lo siguiente: cuando en una configuración de alta simetría corresponden, en el átomo central, estados electrónicos degenerados, los ligados tienden a adoptar configuraciones de más baja simetría con disminución de la degeneración. De este modo, resulta la disminución de la energía del sistema.

### H

#### HISTÉRESIS

Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha generado.

### I

#### INDUCCIÓN

Acción que un campo eléctrico o magnético ejerce sobre un conductor (Serway, 1995).



## BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD III

- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2007). *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*. Madrid.
- Diccionario LEXICOON. (2016). Resistor [en línea] (Edición 3.8). Disponible en <http://lexicoon.org/es/resistor>
- Giancoli, D. (2001). *Física para ciencias e ingeniería*. México: Pearson Educación.
- Morones Ibarra, J. R. (2008). La medición del tiempo. *Revista Ingenierías*. Vol. 11 (41), pp.14 – 23. Disponible en: <http://bit.ly/29rqB6D>
- Ramos, F. (2010). *Física: Teoría y práctica*. Lima: Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2016). Capítulo 4. La presión atmosférica. En *Aprendiendo* [en línea]. Lima: SENAMHI. Recuperado de <http://www.senamhi.gob.pe/?p=1003>
- Serway, R. A. (1995). *Física II*. México: Mc Graw Hill.
- Young, H. & Freedman, R. (2009). *Física universitaria con física moderna* (12ª ed., Vols. 1-2). México: Pearson Educación. Volumen 1 disponible en <http://fis.ucv.cl/docs/Fis231/textos/Fisica-Universitaria-Sears-Zemansky-12va-Edicion-Vol1.pdf> y volumen 2 en [https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi\\_blog/r/Fisica\\_General\\_-\\_Fisica\\_Universitaria\\_Vol\\_2\\_ed\\_12\(Sears-Zemansky\).pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2_ed_12(Sears-Zemansky).pdf)



## AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD III

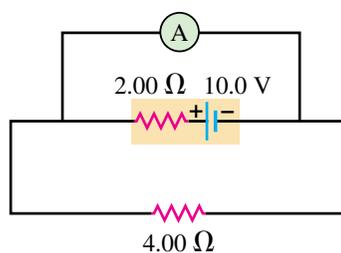
Resuelva los siguientes problemas y marque su respuesta utilizando los conceptos aprendidos en esta unidad. Cada pregunta vale 2 puntos.

1. La corriente en un lazo de circuito que tiene una resistencia de  $R_1$  es 2 A. La corriente se reduce a  $1,60^a$  cuando un resistor adicional  $R_2 = 3\Omega$  se añade en serie con  $R_1$ . ¿Cuál es el valor de  $R_1$ ?
  - a)  $10\Omega$
  - b)  $12\Omega$
  - c)  $8\Omega$
  - d)  $20\Omega$
2. Un técnico en reparación de televisores necesita un resistor de  $100\Omega$  para componer un equipo defectuoso. Por el momento no tiene resistores de este valor. Todo lo que tiene en su caja de herramientas son un resistor de  $500\Omega$  y dos resistores de  $250\Omega$ . ¿Cómo se puede obtener la resistencia deseada usando los resistores que tiene a la mano?
  - a) 1 serie, 2 en paralelo
  - b) las tres en paralelo
  - c) los tres resistores en serie
  - d) las 2 de  $250\Omega$  en serie y la 500 en paralelo
3. Una corriente de 3.6 A fluye a través de un faro de automóvil. ¿Cuántos Coulombs de carga pasan por el faro en 3.0 h?
  - a)  $4,6 \times 10^4 C$
  - b) 760000C
  - c)  $8,7 \times 10^3 C$
  - d)  $3,89 \times 10^4 C$
4. Un alambre de plata de 2.6 mm de diámetro transfiere una carga de 420 C en 80 min. La plata contiene  $5.8 \times 10^{23}$  electrones libres por metro cúbico. ¿Cuál es la corriente en el alambre?
  - a)  $8,75 \times 10^{-2} A$
  - b)  $7,65 \times 10^{-2} A$
  - c)  $9,87 \times 10^{-2} A$
  - d)  $4,36 \times 10^{-2} A$

5. Un alambre de cobre tiene una sección transversal cuadrada de 2.3 mm por lado. El alambre mide 4.0 m de longitud y conduce una corriente de 3.6 A. La densidad de los electrones libres es  $8.5 \times 10^{28}/\text{m}^3$ . Calcule la densidad de la corriente en el alambre.

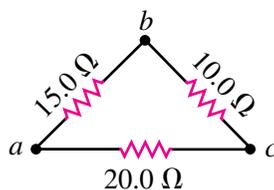
- a)  $5,78 \times 10^5 \text{ A/m}^2$   
 b)  $6,81 \times 10^5 \text{ A/m}^2$   
 c)  $4,67 \times 10^5 \text{ A/m}^2$   
 d)  $1,65 \times 10^5 \text{ A/m}^2$

6. Se conecta un amperímetro idealizado a una batería como se ilustra en la figura. Determine la lectura del amperímetro.



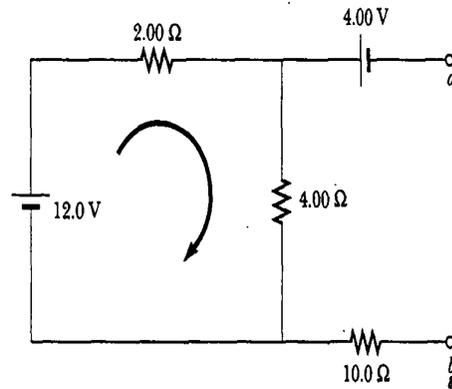
- a) 3A  
 b) 4A  
 c) 9A  
 d) 5 A

7. En la figura, se muestra un arreglo triangular de resistores. ¿Qué corriente tomaría este arreglo desde una batería de 35.0 V, con resistencia interna despreciable, si se conecta a través de ab?



- a) 3.5 A  
 b) 5 A  
 c) 6 A  
 d) 7,6 A

8. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos a y b en la figura?



- a) 4V  
b) 6V  
c) 3V  
d) 12V
9. Un alambre con una masa por unidad de longitud  $0,5\text{g/cm}$  conduce una corriente de  $2\text{ A}$  horizontal hacia el sur. ¿Cuál es magnitud del campo magnético mínimo necesario para levantar verticalmente este alambre?
- a)  $0,345\text{ T}$   
b)  $0,78\text{ T}$   
c)  $5,7\text{ T}$   
d)  $0,275\text{ T}$
10. Un electroimán produce un campo magnético de  $0,550\text{ T}$  en una región cilíndrica con radio de  $2,50\text{ cm}$  entre sus polos. Un alambre rectilíneo que transporta una corriente de  $10,8\text{ A}$  pasa por el centro de esta región en forma perpendicular a los ejes de la región cilíndrica y el campo magnético. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza ejercida sobre el alambre?
- a)  $2,978\text{ N}$   
b)  $0,98\text{ N}$   
c)  $0,297\text{ N}$   
d)  $3,65\text{ N}$

UNIDAD IV

# CORRIENTE, ÓPTICA Y FÍSICA MODERNA

 DIAGRAMA DE PRESENTACIÓN DE LA UNIDAD IV



## ORGANIZACIÓN DE LOS APRENDIZAJES

### Resultado de aprendizaje de la Unidad IV

Al finalizar la unidad, el estudiante será capaz de resolver ejercicios de corriente alterna y ondas electromagnéticas tomando en cuenta los principios de la física moderna.

CONOCIMIENTOS	HABILIDADES	ACTITUDES
<p><b>Tema N.º 1: CORRIENTE ALTERNA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Corriente alterna</li> <li>2 Resistencia y reactancia</li> <li>3 Potencia en circuitos de corriente alterna</li> <li>4 Transformadores</li> </ol> <p><b>Tema N.º 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Ecuación de Maxwell y O.E.M</li> <li>2 O.E.M planas</li> <li>3 O.E.M sinusoidales</li> <li>4 Energía y cantidad de movimiento de las O.E.M</li> <li>5 El espectro electromagnético</li> </ol> <p><b>Tema N.º 3: ÓPTICA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Naturaleza y propagación de la luz, reflexión y refracción, reflexión interna total</li> <li>2 Óptica geométrica e instrumentos (espejos planos y esféricos, lentes delgadas)</li> <li>3 La lente de aumento</li> <li>4 Microscopios y telescopios</li> <li>5 Interferencia y difracción</li> </ol> <p><b>Tema N.º 4: FÍSICA MODERNA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Invariabilidad de las leyes físicas</li> <li>2 Relatividad de la simultaneidad</li> <li>3 Relatividad de los intervalos de tiempo</li> <li>4 Relatividad de la longitud</li> <li>5 Masa relativista</li> <li>6 Transformación de Lorentz</li> <li>7 Cantidad de movimiento relativista</li> <li>8 Trabajo y energía relativista</li> <li>9 Mecánica newtoniana y relatividad.</li> </ol> <p><b>Lectura Seleccionada N.º1</b> Invisibilidad electromagnética</p> <p><b>Autoevaluación de la Unidad IV</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utiliza instrumentos, técnicas y fórmulas, para aplicar en la corriente alterna, ondas electromagnéticas, óptica y física moderna.</li> <li>2. Resuelve ejercicios de corriente alterna, ondas electromagnéticas, óptica y física moderna.</li> <li>3. Realiza experimentos en laboratorio.</li> <li>4. Redacta correctamente los informes de laboratorio.</li> </ol> <p><b>Actividad N.º 4</b> Resolución de problemas propuestos.</p> <p><b>Control de lectura N.º 4</b> Evaluación de los temas n.º 1, 2, 3 y 4 más los contenidos de las lecturas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toma conciencia del rol de ser estudiante universitario, de la puntualidad y respeto en el desarrollo de las clases.</li> <li>2. Demuestra interés en los nuevos conocimientos y respeta la opinión de sus compañeros.</li> <li>3. Juzga la importancia del cálculo en su quehacer cotidiano y profesional.</li> <li>4. Trabaja individualmente y grupalmente.</li> </ol>

# TEMA N° 1: CORRIENTE ALTERNA

## 1. CORRIENTE ALTERNA

Hoy llega la noche y las luces iluminan la ciudad. Necesitamos planchar o cargar un celular, pero con solo enchufar los artefactos al tomacorriente tenemos el problema solucionado. Casi nadie se pone a pensar que siglos atrás esto no era posible, que fue gracias al ingeniero Nikola Tesla, quien inventó la corriente alterna y vio sus ventajas, y a Westinghouse, que fue quien la distribuyó, que ahora aprovechamos en todos los ámbitos sus beneficios. En esta unidad conoceremos los principios en los que se basa, sus características y aplicaciones.

Para empezar, definimos corriente alterna como la corriente eléctrica que varía en forma cíclica en el tiempo, a diferencia de la corriente continua en la que no hay variación. Esta es necesaria para adecuarla a los usos y dar seguridad a los consumidores.

Para generar esta corriente se requiere una fem o voltajes alternos, es decir un dispositivo que, aprovechando el principio de inducción electromagnética, convierte la energía mecánica en energía eléctrica y suministra una diferencia de potencial y/o una corriente que varía en forma sinusoidal.

Este voltaje queda representado por:

$$v = V \cos \omega t$$

$v$  representa la diferencia de potencial instantánea,  $V$  la diferencia de potencial máxima, denominada amplitud de voltaje,  $\omega$  frecuencia angular.

De manera similar la intensidad de corriente queda definida como:

$$i = I \cos \omega t$$

Donde  $i$  representa la corriente instantánea,  $I$  la corriente máxima denominada amplitud de corriente.

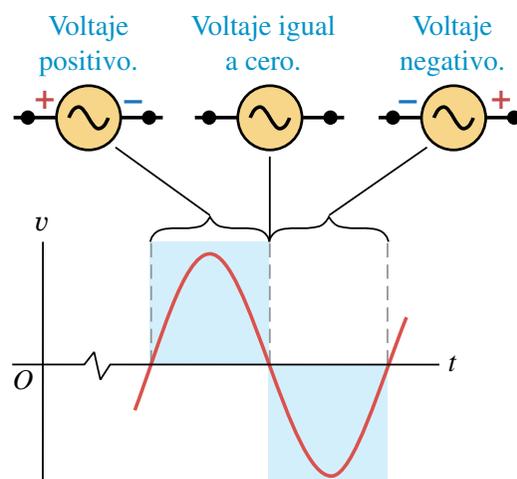


Figura 49. Voltaje a través de la fuente de c.a.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1062

Para representar estas variaciones se utiliza los denominados fasores y diagramas de fasores. Estos son diagramas de vectores giratorios de valor instantáneo de una cantidad que varía de forma sinusoidal en el tiempo y que se representa mediante la proyección sobre un eje horizontal de un vector con longitud igual a la amplitud de la cantidad.

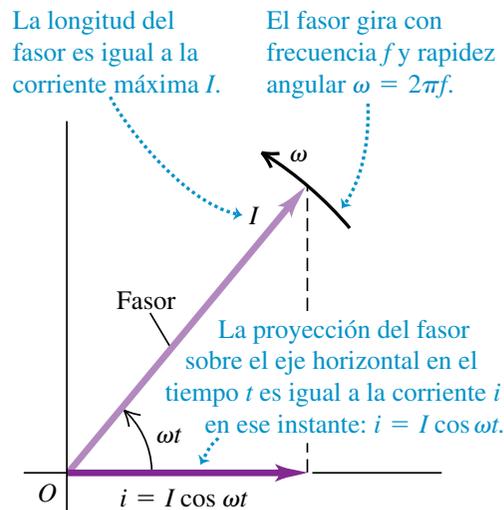


Figura 50. Proyección del vector longitud.  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1062.

Para una corriente sinusoidal, las corrientes media rectificada y eficaz (rms, cuadrática media) son proporcionales a la amplitud de corriente  $I$ . De manera similar, el valor rms de un voltaje sinusoidal es proporcional a la amplitud de voltaje  $V$ .

$$I_{vmr} = \frac{2}{\pi} I = 0.6371 \quad (\text{valor medio rectificado de una corriente sinusoidal})$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{valor cuadrático medio de una corriente sinusoidal})$$

$$V_{rms} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (\text{valor cuadrático medio de un voltaje sinusoidal})$$

## 2. RESISTENCIA Y REACTANCIA

### 2.1. Resistores en un circuito de ca:

Si se considera un resistor con resistencia  $R$  por la que circula una corriente sinusoidal representada por  $i = I \cos \omega t$ , donde  $I$  es la amplitud de corriente, la diferencia de potencial instantánea según la ley de Ohm sería:

$$U_R = iR = (IR) \cos \omega t$$

Si consideramos que el valor máximo de  $V = IR$ , entonces podríamos representar la expresión como

$$v_r = V \cos \omega t$$

Como se ve el voltaje y la corriente dependen de  $\cos \omega t$ , por lo que podemos decir que ambas están en fase y tienen la misma frecuencia.

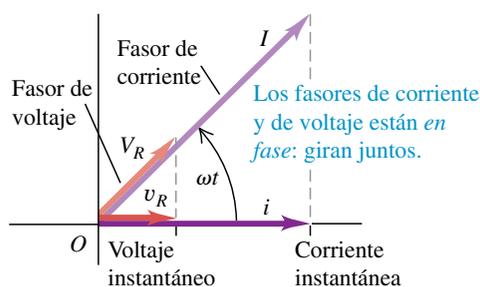


Figura 51. Diagrama de fases.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1065.

## 2.2. Inductor en un circuito de ca:

Recordemos que un inductor es una bobina que recibe una corriente variable y que genera en sí misma una fem, que es almacenada como energía en el campo magnético generado por la corriente, que por naturaleza se opone a los cambios en la corriente.

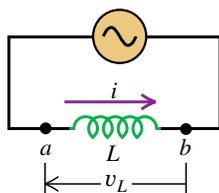


Figura 52. Circuito con fuente de ca e inductor.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1065

En un circuito formado por inductor con auto inductancia  $L$ , no existe resistencia, la corriente se mantiene representada por  $i = I \cos \omega t$ , pero sí una diferencia de potencial definida por

$$v_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} (I \cos \omega t) = -I \omega L \sin \omega t$$

Con un desfase de 90 grados de la corriente con respecto a la diferencia de potencial como se muestra en la figura:

El fasor de voltaje adelanta al fasor de corriente en  $\phi = \pi/2 \text{ rad} = 90^\circ$ .

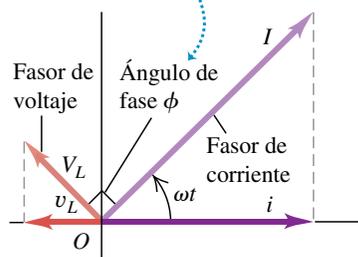


Figura 60. Fasores de voltaje y corriente en un circuito con inductor

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1065

Si representamos la amplitud del voltaje del inductor podríamos representarlo:

$$V_l = I \omega L$$

Denominamos  $\omega L$  reactancia inductiva ( $X_L$ ), que es en realidad una descripción de la fem autoinducida que se opone a cualquier cambio en la corriente a través del inductor.

$$X_L = \omega L$$

Su unidad en el SI es el Ohm ( $\Omega$ ).

### 2.3. Capacitor en un circuito de ca:

Si ahora analizamos un circuito con un capacitor, conforme este se carga y descarga en cada instante hay una corriente  $i$ , que entra en una placa, la cual será la misma que sale de la otra placa y una corriente llamada de desplazamiento igual entre las placas, que sería igual a que la carga se moviera por el capacitor. En este caso la corriente que se produce es  $i = I \cos \omega t$  y el sentido antihorario es considerado positivo, entonces el voltaje instantáneo estaría dado por:

$$v_C = \frac{I}{\omega C} \text{sen } \omega t$$

Recuerde que la corriente instantánea es la tasa de cambio de la carga en el tiempo ( $dQ/dt$ ), así como  $q = CV_C$   $i$  se puede representar de la siguiente forma:

$$I = dQ/dt = C dv_C/dt$$

En este caso el voltaje y la corriente están fuera de fase, los máximos del voltaje aparecen 90 grados después de los máximos de corriente.

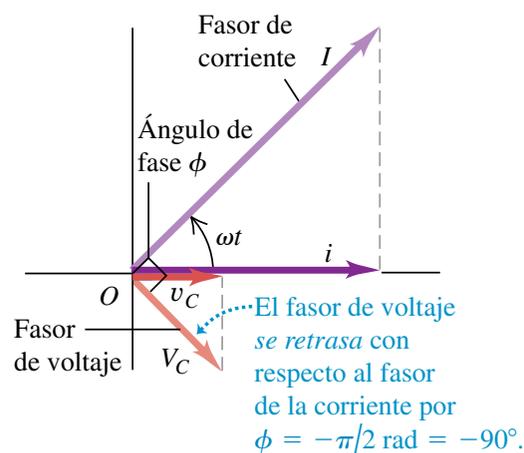


Figura 61. Diagrama de fasores voltaje corriente  
 Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1068

El voltaje máximo está dado por  $V_C = I/\omega C$ , siendo  $I$  intensidad,  $\omega$  frecuencia angular y  $C$  capacitancia.

Si definimos por  $1/\omega C$  como reactancia capacitiva ( $X_C$ ), con unidades en el SI de Ohm, y la incluimos en la expresión de amplitud de voltaje quedaría como:

$$V_C = I X_C$$

Nótese que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la capacitancia y a la frecuencia angular.

### El circuito **L-R-C** en serie

Para un circuito de este tipo:

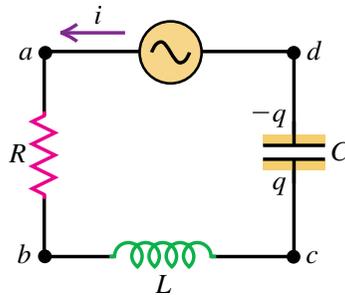


Figura 62. Circuito L-C-I  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1070

Se cumplen las siguientes relaciones:

La diferencia de potencial entre las terminales de un resistor está en fase con la corriente en el resistor y que su valor máximo  $V_R = IR$ .

El voltaje a través de un inductor se adelanta  $90^\circ$  a la corriente. Su amplitud de voltaje está dada por:

$$V_L = IX_L$$

El voltaje a través de un capacitor se retrasa  $90^\circ$  con respecto a la corriente. Su amplitud de voltaje está dada por:

$$V_C = IX_C$$

Para el caso  $X_L > X_C$  tendríamos el siguiente diagrama de fasores:

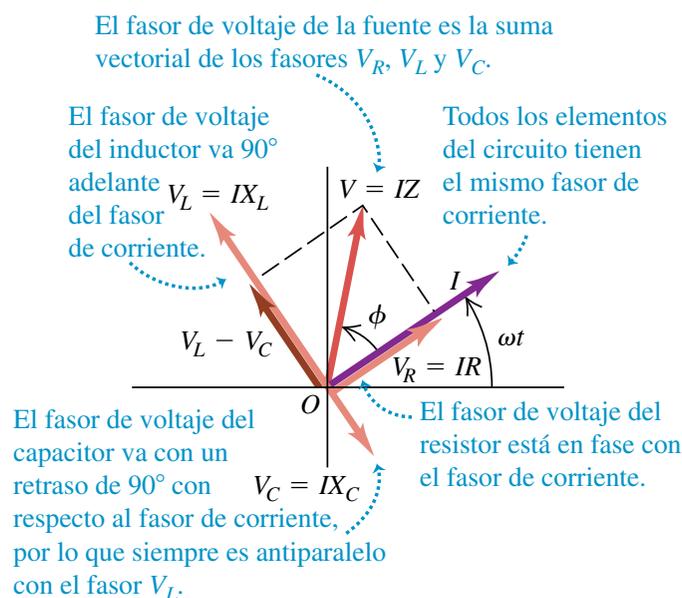


Figura 63. Diagrama de fasores  $X_L > X_C$   
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1070

Para el caso contrario  $X_c > X_L$

Si  $X_L < X_C$ , el fasor de voltaje de la fuente va con retraso con respecto al fasor de corriente,  $X < 0$ , y  $\phi$  es un ángulo negativo entre  $0$  y  $-90^\circ$ .

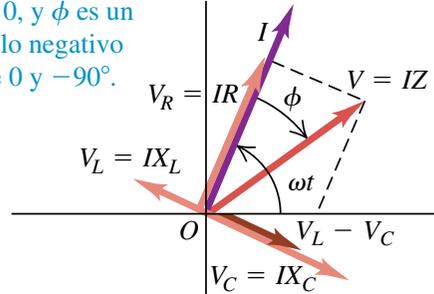


Figura 64. Diagrama de fasores para el caso  $X_L > X_C$ .

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1070.

La magnitud del fasor  $V$  está dada por:

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2}$$

$$V = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

La razón entre la amplitud del voltaje entre las terminales del circuito y la amplitud de la corriente en el circuito se llama **impedancia** y está dada por:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Por lo que la diferencia de potencial podría expresarse como:

$$V = IZ$$

La impedancia también puede ser presentada por:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (\text{impedancia de un circuito } L\text{-}R\text{-}C \text{ en serie})$$

$$= \sqrt{R^2 + [\omega L - (1/\omega C)]^2}$$

### 3. POTENCIA EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNIA

Para un elemento de un circuito de corriente instantánea  $i$ , por el cual hay una diferencia de potencial  $v$ , la potencia está dada por:

$$P = iv$$

Dependiendo del elemento del que se trate podemos definir:

- Si se tratara de un resistor, la curva de potencia es simétrica, el valor de la potencia media estaría dado por la mitad del valor máximo, y estaría dada por estas dos expresiones:

$$P_{\text{med}} = \frac{1}{2}VI \quad (\text{para un resistor}) \quad P_{\text{med}} = \frac{V}{\sqrt{2}} \frac{I}{\sqrt{2}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \quad (\text{para un resistor})$$

- Si el elemento es un inductor, la curva de la potencia es simétrica con respecto al eje horizontal y será positiva la mitad del tiempo y negativa el resto; es decir, la potencia media es cero y la transferencia de energía neta al final del ciclo es cero.
- En el caso de los capacitores, la potencia media es cero, la transferencia de energía neta es cero, suministra energía para cargar y devuelve la energía cuando el capacitor se descarga.

En un circuito RLC:

La potencia promedio entregada por el generador es la siguiente:

$$\mathcal{P}_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi \quad \mathcal{P}_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R$$

Para un circuito de c.a. con voltaje  $v$ , ángulo de fase con respecto a  $i$ , la potencia instantánea

$$p = vi = [V\cos(\omega t + \phi)][I\cos \omega t]$$

## 4. TRANSFORMADORES

Son "dispositivos que cambian el voltaje alterno y la corriente sin producir cambios apreciables en la potencia entregada" (Serway, Física, Tomo II, 1995).

En su forma básica se compone de dos bobinas de alambre, de  $N_1$  vueltas y  $N_2$  vueltas, respectivamente, devanadas en un núcleo de hierro. Una de ellas está conectada a la fuente de voltaje interno, la otra con un resistor. El objetivo del núcleo de hierro es aumentar el flujo magnético y proporcionar un medio para que todo el flujo pase de un devanado al otro.

La fem inducida *por espira* es la misma en las dos bobinas, por lo que podemos ajustar la razón de los voltajes terminales modificando la razón de las espiras:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

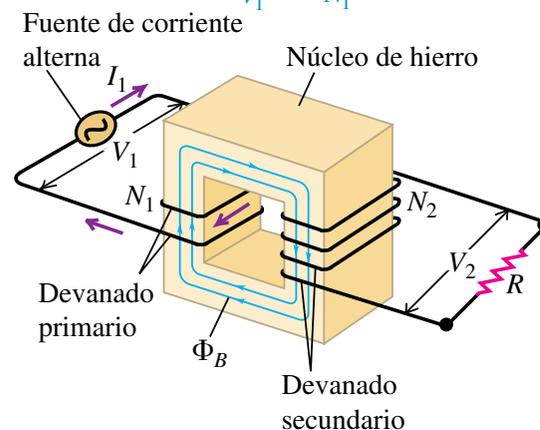


Figura 65. Diagrama de un transformador idealizado  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1080

Cuando el flujo magnético cambia como resultado de la modificación de las corrientes en las dos bobinas, las fem inducidas resultantes son estas:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{y} \quad \varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt}$$

El flujo  $\Phi_B$  es el mismo en los dos devanados por lo que la relación entre las fem quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Si la resistencia en los devanados es cero, entonces, la fem es igual al voltaje entre terminales a través entre el primero y segundo devanado por lo que:

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son amplitudes de voltaje.

Las corrientes en los devanados están relacionadas por:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

## TEMA N.º 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La luz visible emitida por el filamento incandescente de una bombilla eléctrica es un ejemplo de onda electromagnética. Estas ondas se propagan en el espacio y su principal característica es que no necesitan un medio para propagarse, pues propagan energía como cantidad de movimiento. Estas perturbaciones en campos magnéticos y eléctricos se modifican con el tiempo.

En las ondas electromagnéticas sinusoidales, los campos son funciones sinusoidales del tiempo y la posición, con frecuencia y longitud de ondas definidas. Los distintos tipos de ondas electromagnéticas —luz visible, ondas de radio, rayos x y otras— difieren solo en su frecuencia y longitud de onda.

### 1. ECUACIÓN DE MAXWELL Y O.E.M

Son ecuaciones que expresan los principios básicos del electromagnetismo, reunidas por el físico Maxwell quien demostró en 1865 que una perturbación electromagnética se propaga en el espacio libre con una rapidez igual a la de la luz. Maxwell desarrolla, además, el concepto de corriente de desplazamiento, y plantea la existencia probable de las ondas electromagnéticas así como que la naturaleza de las ondas de luz fueran electromagnéticas. Este supuesto fue comprobado y es por esto que ahora tenemos transmisiones de radio y televisión rayos x que son ejemplos manifiestos de dichas ondas. Dichas ecuaciones se plantean de la siguiente manera:

Ley de Gauss para campos eléctricos:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (\text{ley de Gauss})$$

Ley de Gauss Para campos magnéticos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{ley de Gauss del magnetismo})$$

Ley de ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{enc} \quad (\text{ley de Ampère})$$

En esta expresión ya se incluye la corriente de desplazamiento.

Ley de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{ley de Faraday})$$

Estas ecuaciones se aplican en el vacío; si hubiera otro material como medio, se reemplaza la permitividad y permeabilidad en el vacío ( $\mu_0$ ) por la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ) del material.

## 2. O.E.M. PLANAS

Es una onda en la que en cualquier instante los campos magnéticos y eléctricos son uniformes en toda la extensión de cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación. En su forma más simple cumple las siguientes características:

1. La onda es transversal. Tanto  $\vec{B}$  como a  $\vec{E}$  son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Los campos eléctrico y magnético también son perpendiculares entre sí. La dirección de propagación es la dirección del producto vectorial.

$$\vec{E} \times \vec{B}$$

2. Hay una razón definida entre las magnitudes de E y B,  $E=Bc$ .
3. La onda viaja en el vacío con rapidez definida e invariable.
4. Las ondas electromagnéticas no requieren un medio. Lo que ondula en una onda electromagnética son los campos eléctricos y magnéticos.

Se denomina polarización al fenómeno en el que el campo eléctrico siempre es paralelo a determinado eje.

La rapidez de la onda estaría dada por:

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon_0 \mu_0 \quad \text{o} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

## 3. O.E.M SINUSOIDALES

Es la onda en la que B y E en cualquier punto del espacio son funciones sinusoidales del tiempo, y en cualquier instante la variación espacial de los campos también es sinusoidal. Algunas ondas electromagnéticas sinusoidales son ondas planas. Para ondas que se desplazan sobre el eje x tenemos las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= jE_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t) \\ \vec{B}(x, t) &= \hat{k}B_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t) \\ E_{\text{máx}} &= cB_{\text{máx}} \end{aligned}$$

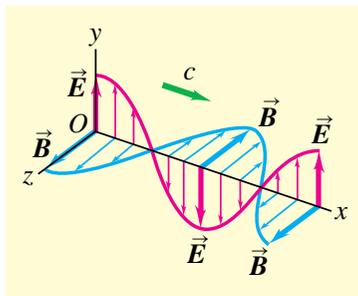


Figura 66. Ondas sinusoidales.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1115.

Donde K es número de onda; j y k, los vectores unitarios de dirección; w, frecuencia angular; x, desplazamiento, y t, tiempo.

La velocidad de la luz, la frecuencia( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) en el vacío, están relacionadas por:

$$C = \lambda f$$

#### 4. ENERGÍA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO DE LAS O.E.M

Las ondas electromagnéticas transportan energía, la cual es aprovechada, por ejemplo, en los microondas, en los rayos láser. Para trabajar este tema, necesitamos conocer la densidad total de energía en los campos magnético y eléctrico que está dada por la siguiente ecuación:

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Donde  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  son permitividad y permeabilidad en el vacío.

Los campos magnético y eléctrico en ondas electromagnéticas están relacionados por

$$B = \frac{E}{c} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E$$

Si unimos estas dos expresiones, podemos decir que la densidad de energía en una onda electromagnética en el vacío es de la siguiente forma:

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E)^2 = \epsilon_0 E^2$$

“Las ondas electromagnéticas también llevan una cantidad de movimiento  $p$  con una densidad de cantidad de movimiento correspondiente (cantidad de movimiento  $dp$  por volumen  $dV$ ) de magnitud” (Young & Freedman, 2009).

$$\frac{dp}{dV} = \frac{EB}{\mu_0 c^2} = \frac{S}{c^2}$$

Donde  $E$  y  $B$  son los campos eléctrico y magnético;  $\mu_0$ , permeabilidad en el vacío;  $c$ , la velocidad de la luz, y  $S$ , el flujo de energía por unidad de área. Esta es una propiedad del campo y no está asociada a la masa de la partícula.

La cantidad de movimiento que se transfiere por unidad de área y por unidad de tiempo, denominada tasa de la cantidad de movimiento electromagnético, está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{S}{c} = \frac{EB}{\mu_0 c} \quad (\text{tasa de flujo de la cantidad de movimiento electromagnética})$$

#### 5. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas, que son producidas por cargas aceleradas. Aunque no hay un punto de división entre un tipo de onda y el siguiente, podemos encontrar:

- Ondas de radio: Usadas en sistemas de comunicación de televisión y radio, son el resultado de cargas que se aceleran a través de un alambre conductor. Su longitud de onda varía de los 0,1m a los  $10^4$ m, las origina los dispositivos electrónicos, y se usan en sistemas de comunicación de televisión y radio.

- Microondas: En estas la longitud de onda varía entre 0,3m y  $10^{-4}$  m. Tienen el mismo origen que las de radio. Por su corta longitud de onda se usan en estudios de propiedades químicas de la materia y en los radares.
- Ondas infrarrojas: Son producidas por moléculas por moléculas y objetos a temperatura ambiente, y absorbidas por los materiales. Esta energía aparece como energía interna generando un incremento de temperatura. Sus beneficios se utilizan en terapia física y fotografía.
- Luz visible: Es la parte del espectro electromagnético que el ojo humano puede detectar. Se produce por el reordenamiento de electrones en átomos y moléculas. Las diferentes longitudes de onda corresponden a los colores cuyas ondas varían de  $7 \times 10^{-7}$ m a  $4 \times 10^{-7}$ m.
- Ondas ultravioletas: La principal fuente son los rayos de sol. Su rango varía entre  $4 \times 10^{-7}$ m y  $6 \times 10^{-10}$ m. Estas ondas son las causantes del bronceado, pero también son vinculados con las cataratas, por eso la recomendación del uso lentes de protección uv y de protección solar.
- Rayos x: Su rango varía entre  $10^{-8}$ y  $10^{-12}$ m. Una de sus fuentes es la desaceleración de electrones de alta energía en un blanco metálico. Su uso más conocido es en medicina, para diagnóstico y tratamiento.
- Rayos Gamma: Son muy penetrantes y dañinos. Su longitud de onda rango varía entre  $10^{-10}$  a  $10^{-14}$  m. Son emitidos por núcleos radiactivos o radiaciones nucleares.



### ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 1

Analice y resuelva las siguientes situaciones y problemas:

1. La corriente en una línea de energía de ca cambia de sentido 120 veces por segundo y su valor medio es de cero. Explique cómo es posible que se transmita energía en un sistema así.
2. La placa en la parte posterior de cierto escáner de computadora indica que la unidad consume una corriente de 0.34 A de una línea de 120 V a 60 Hz. Determine a) la corriente eficaz (rms), b) la amplitud de corriente, c) la corriente media y d) el cuadrático medio de la corriente.
3. Un inductor, un capacitor y un resistor están conectados en serie a una fuente de ca. Si se duplican la resistencia, la inductancia y la capacitancia, ¿en qué factor cambia cada una de las siguientes cantidades? Indique si aumentan o disminuyen la frecuencia angular de resonancia.
4. Si se miden los campos eléctrico y magnético en un punto del espacio donde hay una onda electromagnética, ¿es posible determinar la dirección de donde proviene la onda? Explique su respuesta.
5. Para una onda electromagnética que se propaga en el aire, determine su frecuencia si tiene una longitud de onda: a) de 5.0 km; b) 5m.
6. Una onda electromagnética sinusoidal, que tiene un campo magnético de amplitud 1.25  $\mu$ T y longitud de onda de 432 nm, viaja en la dirección +x a través del espacio vacío. a) ¿Cuál es la frecuencia de esta onda? b) ¿Cuál es la amplitud del campo eléctrico asociado?
7. Si usted carga un peine frotándolo en su cabello y después lo acerca a un imán de barra, ¿los campos eléctrico y magnético producidos constituyen una onda electromagnética?

## TEMA N.º 3: ÓPTICA

“La óptica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz, sus características y manifestaciones” (Ramos, 2010)

### 1. NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ, REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN, REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

La luz ha sido desde siempre un tema de investigación, hubo teorías que buscaban explicar el fenómeno. Huygens propuso que la luz era un fenómeno ondulatorio igual que el sonido; Newton la consideró una corriente de partículas que eran emitidas por una fuente de luz. Esta última teoría explicaba el fenómeno de reflexión. Por otro lado, Maxwell demostró que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia; en esta teoría predice la velocidad de la luz que hoy conocemos. Por último, la teoría cuántica supone que la luz presenta un aspecto corpuscular, de energía llamada fotones, que puede ser cuantificada y que según Einstein es proporcional a la onda electromagnética.

En conclusión, podemos decir que la luz posee una naturaleza dual, que se comporta como una onda en unas ocasiones y en otras como un fotón.

Para fines de estudio, en algunos fenómenos como la reflexión y refracción, la propagación de la luz es representada por rayos, por lo que a esta parte de estudio se le denomina óptica geométrica.

#### 1.1. Reflexión y Refracción

Dados dos medios transparentes separados por una interfaz lisa, si una onda luminosa incide en la superficie de separación entre ellos, parte de la onda rebota, y la otra parte atraviesa el segundo medio cambiando de dirección.

En el primer caso estamos hablando de reflexión; en el segundo, de refracción.

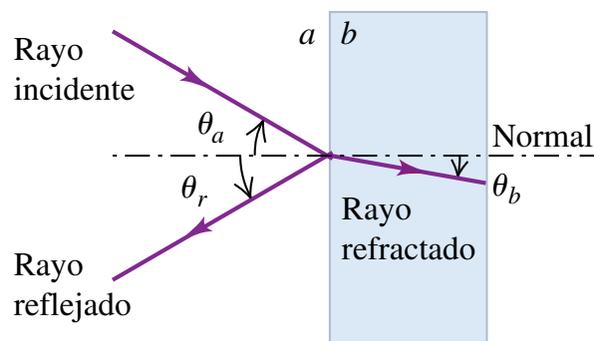


Figura 67. Representación de rayos incidentes, reflejado y refractado  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1124

A la onda luminosa que incide en los medios se le denomina rayo incidente. A la línea perpendicular a la superficie en el punto de incidencia se le denomina normal. El ángulo que forma el rayo incidente con la normal se denomina ángulo incidente ( $\theta_a$ ). Al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal se le llama ángulo de reflexión ( $\theta_r$ ), y al ángulo que forma el rayo refractado con la normal, ángulo de refracción ( $\theta_b$ ).

La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se llama reflexión especular; si la reflexión es dispersa a partir de una superficie áspera, se llama reflexión difusa.

En este fenómeno se cumple que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión  $\theta_a = \theta_r$ . Para todos los pares de materiales y longitudes de onda, el rayo incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano.

Un concepto importante en la óptica geométrica se denomina índice de refracción de un material óptico, denotado por  $n$ , que es la razón entre la rapidez de la luz  $c$  en el vacío y la rapidez de la luz  $v$  en el material.

$$n = c/v$$

Este concepto nos va ayudar a representar la característica de la refracción denominada la ley de refracción o ley de Snell que establece que la relación entre los senos de los ángulos incidentes y refractados es igual al inverso de los índices de refracción de los medios:

$$\frac{\text{sen}\theta_a}{\text{sen}\theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

$$n_a \text{Sen}\theta_a = n_b \text{sen}\theta_b$$

En este caso el rayo incidente y la normal están en el mismo plano.

## 2. ÓPTICA GEOMÉTRICA E INSTRUMENTOS (ESPEJOS PLANOS Y ESFÉRICOS, LENTES DELGADAS)

Como se ha comentado líneas arriba, la óptica geométrica estudia los fenómenos en los cuales el haz de luz es tratado como un rayo, suponiendo que viaja en línea recta. En este grupo se incluyen las imágenes que se forman por reflexión o por refracción, cuando estas ondas inciden en superficies plana o esféricas.

### 2.1. Imágenes formadas en espejos planos:

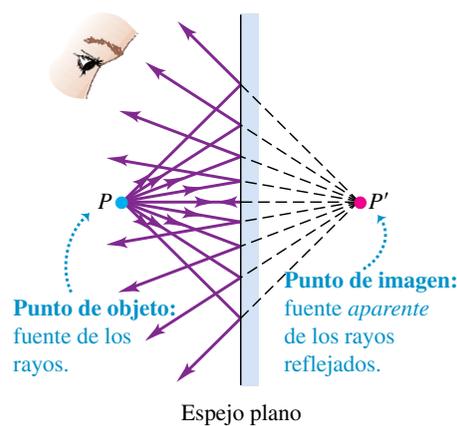


Figura 68. Imagen formada en un espejo plano  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1158

Observemos la figura: el punto  $p$  se denomina el objeto y es desde donde se irradian los rayos de luz. Si el objeto emite esta luz, se le denomina autoluminoso; si no lo fuera, sucede que refleja los rayos de alguna otra fuente. Ahora bien, los rayos luminosos provenientes del objeto alcanzan los ojos izquierdo y derecho del observador a diferentes ángulos; el cerebro del observador procesa tales diferencias para inferir la distancia del observador

al objeto. Cuando los rayos reflejados por el objeto se encuentran con una superficie plana pulimentada, dependiendo del índice de refracción de la superficie, estos se reflejarán parte o totalmente. Estos rayos tendrán una dirección que es como si hubiesen sido reflejados por el punto rojo  $p'$  al que denominaremos imagen. Un ejemplo claro de esto es el mirarnos en un espejo. Las características de la imagen formada son las siguientes:

- La imagen es virtual, es decir, se encuentra donde se forma la imagen.
- La imagen es derecha, pero invertida de derecha a izquierda.
- La distancia al objeto es igual a la de la imagen.
- La imagen es del mismo tamaño que la del objeto.

Si dos espejos planos forman un ángulo  $\theta$ , el número de imágenes que se forman está dado por  $N$ :

$$N=360/\theta-1$$

Para un objeto extenso, la imagen se forma por la intersección de los rayos proyectados.

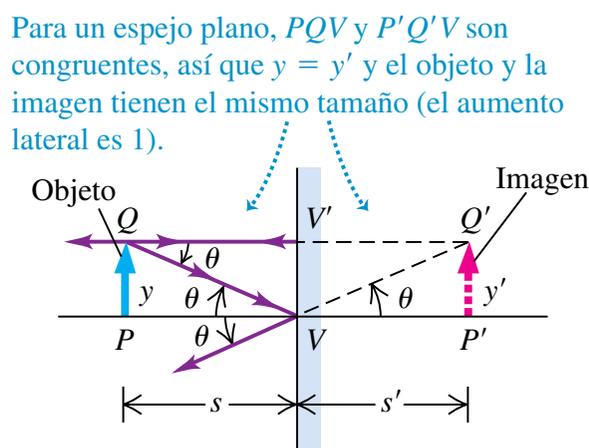


Figura 69. Formación de imagen de un objeto extenso

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1159

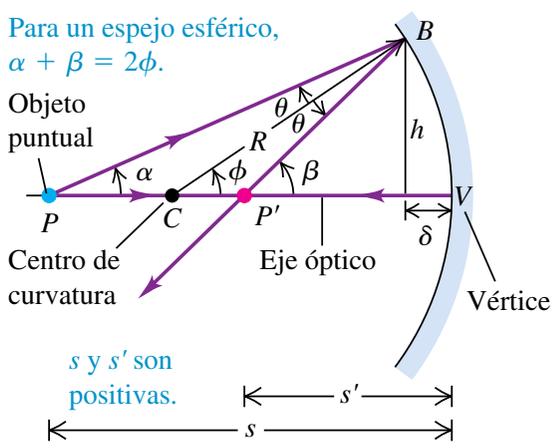
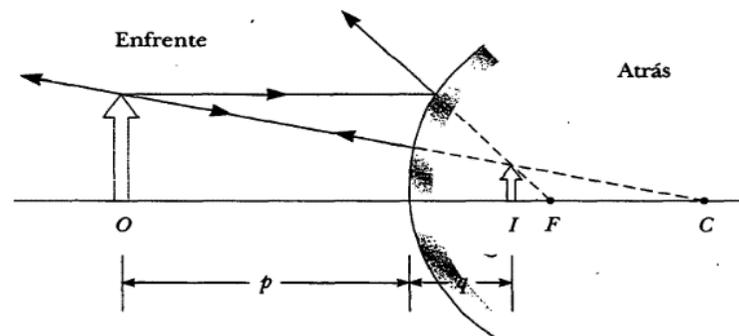
El aumento lateral es la relación entre los tamaños de la imagen y del objeto, y está representado por  $M=y'/y$ .

## 2.2. Imágenes en espejos esféricos:

Un espejo esférico es un casquete esférico pulido, que dependiendo de qué parte es la pulida será cóncavo (parte pulida interna) o convexo (parte pulida externa). Los espejos esféricos forman imágenes de acuerdo a su estructura y sus características las veremos en el siguiente cuadro:

Tabla 4.

Características y elementos de espejos esféricos

Tipo de espejo	Características y Elementos
<p><b>Cóncavo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Centro de curvatura (C)</li> <li>Vertice (v)</li> <li>Eje óptico (CV)</li> <li>Foco (p')</li> <li>Distancia focal (<math>s' = R/2</math>)</li> <li>Distancia al objeto (s)</li> </ul>	<p>Para un espejo esférico, <math>\alpha + \beta = 2\phi</math>.</p>  <p>Objeto puntual</p> <p>Centro de curvatura</p> <p>Eje óptico</p> <p>Vértice</p> <p><math>s</math> y <math>s'</math> son positivas.</p>
<p><b>Convexo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Centro de curvatura (C)</li> <li>Foco (f)</li> <li>Distancia al objeto (p)</li> <li>Distancia a la imagen (q)</li> <li>Eje óptico (OC)</li> </ul>	 <p>Enfrente</p> <p>Atrás</p> <p>O</p> <p>I</p> <p>F</p> <p>C</p> <p>p</p>

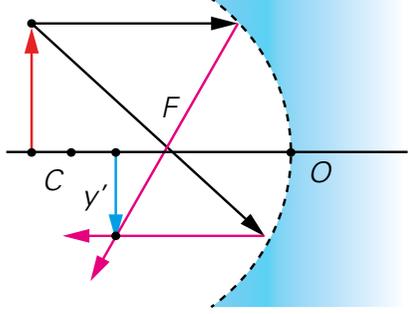
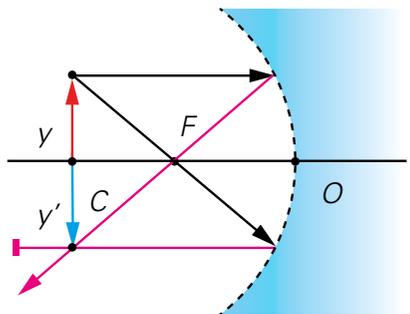
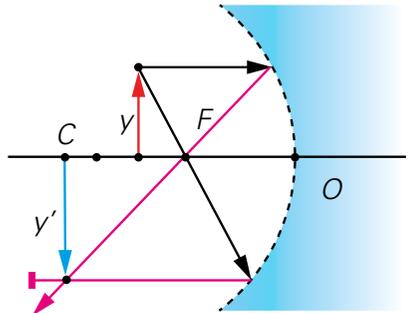
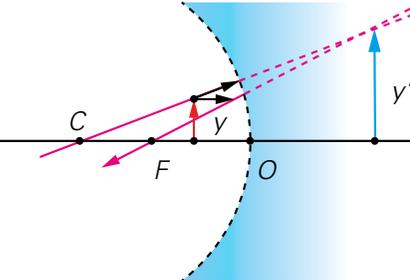
Fuente: Adaptado de Young & Freedman, 2009

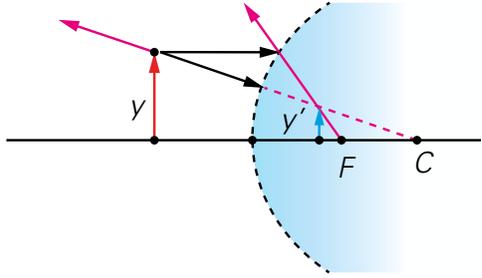
En la formación de imágenes en espejos esféricos se consideran 3 rayos principales, que al intersectarse nos permiten ubicar las imágenes:

- Rayos paralelos: Aquellos que inciden en el espejo en forma paralela al eje principal y se reflejan pasando por el foco.
- Rayos focales: Son aquellos que inciden en el espejo pasando por el foco y se reflejan paralelos al eje principal.
- Rayos centrales: Son aquellos que inciden en el espejo pasando por el centro de curvatura y se reflejan en la misma dirección.

Observemos cómo se forman las imágenes en estos espejos:

Tabla 5  
Formación de imágenes en espejos esféricos.

Tipo de espejo	Imagen
<p><b>Cóncavo</b></p>	
<p>Caso 1: el objeto se ubica detrás del centro de curvatura. La imagen es real, invertida y de menor tamaño.</p>	
<p>Caso 2: El Objeto se ubica en el centro de curvatura. La imagen es real, invertida, de igual tamaño.</p>	
<p>Caso 3: El objeto se encuentra entre el centro de curvatura y el foco. La imagen es real, invertida, de mayor tamaño.</p>	
<p>Caso 4: El objeto se encuentra entre el foco y el vértice: La imagen es virtual, derecha, y de mayor tamaño.</p>	

Tipo de Espejo	Imagen
<p><b>Convexo</b></p> <p>La imagen en el espejo es virtual y derecha, de menor tamaño que el objeto.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

En los espejos esféricos en general se cumplen las siguientes relaciones:

- La distancia focal es la mitad del radio:  $f=R/2$
- Se cumple la regla general de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

- El aumento lateral está dado por menos la razón entre el tamaño de la imagen y del objeto:

$$m = -\frac{s'}{s}$$

- La distancia al imagen será positiva cuando es real; negativa, si es virtual.
- En un espejo cóncavo, la distancia focal y el radio son positivos, al igual que las distancias al objeto e imagen respectivamente.
- En un espejo convexo, la distancia focal y el radio son negativos, la distancia al objeto es positiva.

### 2.3 Lentes delgadas:

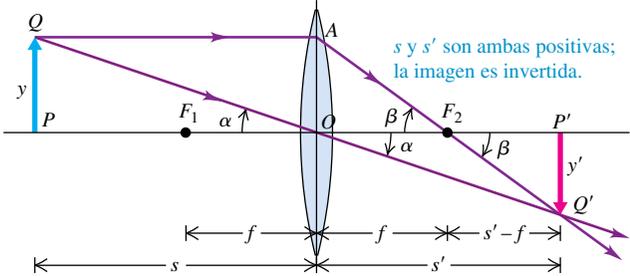
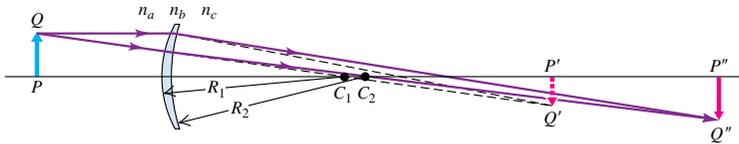
Young & Freedman (2009) nos dicen sobre las lentes delgadas lo siguiente:

Es el dispositivo óptico más conocido y de uso más extendido, que es un sistema óptico con dos superficies refractivas. La lente más simple tiene dos superficies *esféricas* lo suficientemente próximas entre sí como para que podamos despreciar la distancia entre ellas (el espesor de la lente)... (p. 1174).

Pueden ser:

Tabla 6

Tipos y características de lentes delgadas

Tipo de lente y característica	Representación	Características.
Convergente: Cualquier lente que sea más gruesa en el centro que en los bordes.		Todos los rayos refractados en las lentes provenientes de rayos incidentes paralelos, convergen en punto del plano focal. La distancia focal y el radio son positivos.
Divergente: Cualquier lente que sea más gruesa en los bordes que en el centro.		La imagen que se forma es virtual, derecha y de menor tamaño que el objeto. La distancia focal y el radio son negativos..

Fuente: Adaptado de Young &amp; Freedman, 2009

Cumplen la relación:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (\text{relación objeto - imagen, lente delgada}) \quad m = -\frac{s'}{s}$$

Donde  $s$  es la distancia al objeto y  $s'$  la distancia a la imagen, y  $m$  el aumento lateral.

Además, se cumple la ecuación del fabricante que es la relación entre la distancia focal  $f$ , el índice de refracción  $n$  de la lente y los radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  de las superficies de la lente.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{ecuación del fabricante de lentes para una lente delgada})$$

Esta relación ( $1/f$ ) se denomina potencia de la lente; se da en dioptrías y es la que nos da el oculista al darnos la receta de los lentes. Así, por ejemplo, para corregir la hipermetropía recetan lentes convergentes, y, para el caso de la miopía, un lente divergente. El lente refracta el rayo lejos del eje principal antes que entre al ojo, permitiendo que se enfoque en la retina.

### 3. LALENTE DE AUMENTO

Es una lente convergente que permite formar una imagen virtual más grande y alejada del ojo que el objeto.

“El tamaño aparente de un objeto está determinado por el tamaño de su imagen en la retina. En el ojo no asistido, este tamaño depende del *ángulo*  $\theta$  que subtende el objeto en el ojo, conocido como su tamaño angular...” (Young & Freedman, 2009, p. 1189). Este puede ser más grande que el tamaño angular del objeto.

La razón entre el ángulo subtendido del lente ( $\theta'$ ), con respecto al ángulo  $\theta$ , sin lente, se denomina aumento angular y está dado por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \quad (\text{aumento angular})$$

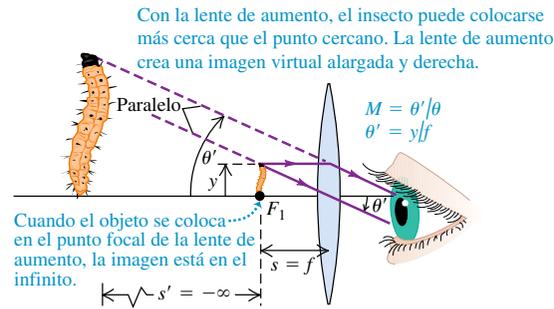


Figura 70. como se forma la imagen con lente de aumento.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1189.

Ejemplo de lo que estamos hablando son las lupas.

## 4. MICROSCOPIOS Y TELESCOPIOS

### 4.1. Microscopio:

Acerca del microscopio, Serway (1995) nos dice lo siguiente: Dispositivo formado por la combinación de dos lentes: un lente objetivo el cual tiene una longitud focal muy corta  $f_1 < 1\text{cm}$ , y un segundo lente ocular que tiene una distancia focal  $f_2$  de unos cuantos cms. Ambas lentes están separadas una distancia  $L$ . El objeto que se coloca en el lado extremo forma una imagen invertida real cerca del punto focal del ocular, el ocular sirve como un simple amplificador que produce una imagen real invertida.

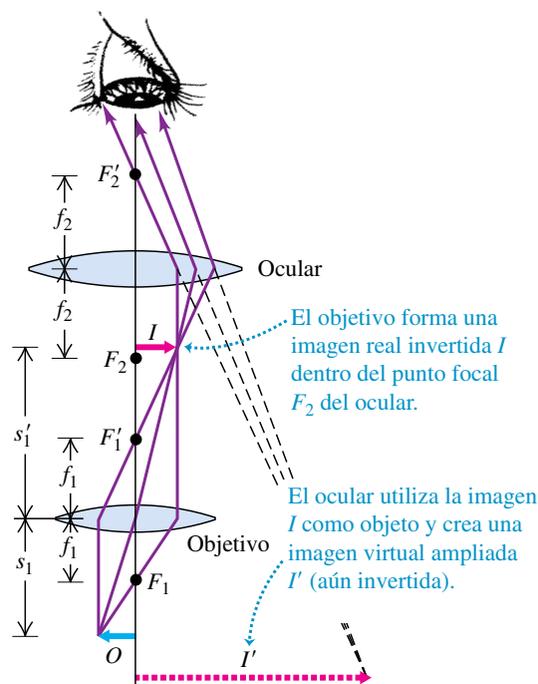


Figura 71. Funcionamiento de un microscopio.

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1191.

## 4.2. Telescopio:

Dispositivo que sirve para ver objetos de gran tamaño a mucha distancia. Utiliza una lente como objetivo, por eso se le conoce como telescopio de refracción o refractor. La lente objetivo forma una imagen real reducida  $I$  del objeto. Esta imagen es el objeto para la lente ocular, la cual forma una imagen virtual ampliada de  $I$ . Los objetos que se observan con un telescopio, por lo regular, están tan lejos del instrumento que la primera imagen  $I$  se forma casi exactamente en el segundo punto focal de la lente objetivo. Si la imagen final  $I'$  formada por el ocular se halla en el infinito (para ser vista con la máxima comodidad por un ojo normal), la primera imagen también debe estar en el primer punto focal del ocular. La distancia entre objetivo y ocular, que es la longitud del telescopio, es, por ende, la suma de las distancias focales del objetivo y del ocular:  $f_1 + f_2$ .

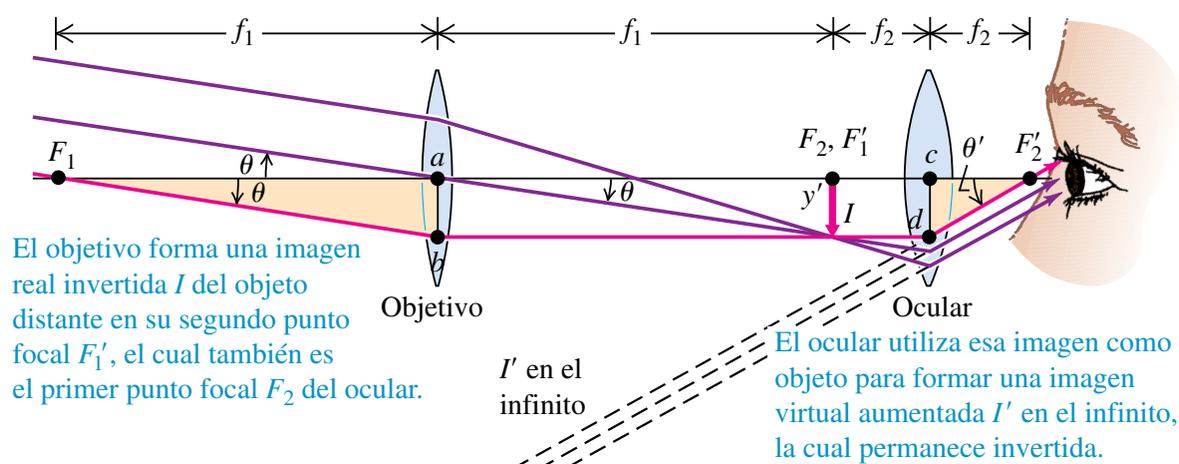


Figura 72. Formación de imágenes en un telescopio

Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1193

## 5. INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN

### 5.1. Interferencia:

“Se refiere a cualquier situación en la que dos o más ondas se traslapan en el espacio. Cuando esto ocurre, la onda total en cualquier punto y en cualquier instante está gobernada por el principio de superposición” (Young & Freedman, 2009, 1208).

En el caso de la luz monocromática es aquella que tiene una sola frecuencia. La coherencia es una relación de fase definida y constante entre dos ondas. El traslape de ondas provenientes de dos fuentes coherentes de luz monocromática forma un patrón de interferencia. El principio de superposición establece que la perturbación total ondulatoria en un punto cualquiera es la suma de las perturbaciones debidas a las ondas individuales.

Cuando dos fuentes están en fase, ocurre interferencia constructiva en puntos donde la diferencia en la longitud de las trayectorias desde las dos fuentes es igual a cero o un número entero de longitudes de onda; la interferencia destructiva tiene lugar en puntos donde la diferencia es la mitad de un número entero de longitudes de onda. Si dos fuentes que están separadas por una distancia  $d$  están muy alejadas de un punto  $P$ , y la recta entre las fuentes y  $P$  forma un ángulo  $\theta$  con la recta perpendicular a la línea de las fuentes, entonces la condición para que haya interferencia constructiva en  $P$  es:

$$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2)$$

(interferencia constructiva)

La condición para que haya interferencia destructiva es la ecuación.

$$d \operatorname{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$   
 (interferencia destructiva)

Cuando  $\theta$  es muy pequeño, la posición  $y_m$  de la  $m$ -ésima franja brillante en una pantalla colocada a una distancia  $R$  de las fuentes está dada por la ecuación:

$$y_m = R \frac{m\lambda}{d}$$

(franjas brillantes)

## 5.2. Difracción:

Son patrones de interferencia que se forman cuando un objeto opaco se interpone entre una fuente puntual de luz y una pantalla, como en la figura, la sombra del objeto forma una línea perfectamente definida. Nada de luz incide en la pantalla en los puntos que están dentro de la sombra, y el área externa a la sombra aparece iluminada de modo casi uniforme. La naturaleza ondulatoria de la luz origina efectos que resultarían incomprensibles con base en el modelo simple de la óptica geométrica. Se produce una clase importante de estos efectos cuando la luz incide en una barrera que tiene una abertura o un borde.

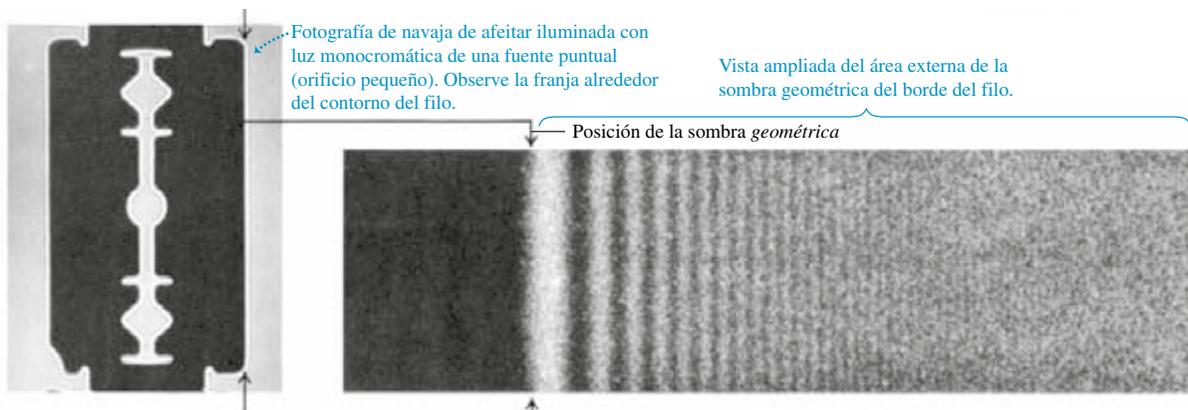


Figura 73. Fenómeno de difracción.  
 Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1235.

Se presentan los siguientes casos:

- Difracción de Fraunhofer (1): Cuando la fuente y el observador se encuentran tan lejos de la superficie obstructora como para considerar como paralelos los rayos salientes.
- Difracción de Fresnel (2): Cuando la fuente y el observador están relativamente cerca de la superficie obstructora.
- Difracción de una sola ranura (3): La luz monocromática que pasa a través de una ranura angosta de ancho  $a$  produce un patrón de difracción en una pantalla distante. La condición para que exista difracción destructiva en un punto  $p$ , un ángulo  $\theta$ , está dada por:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

La intensidad en función del ángulo  $\theta$  está dada por:

$$I = I_0 \left\{ \frac{\text{sen}[\pi a(\text{sen}\theta)/\lambda]}{\pi a(\text{sen}\theta)/\lambda} \right\}^2$$

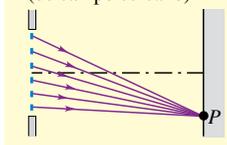
- Rejillas de difracción (4): Una rejilla de difracción consiste en un gran número de ranuras finas paralelas, espaciadas una distancia  $d$ .
- Difracción de rayos x: Un cristal actúa como una rejilla tridimensional de difracción ante los rayos x, cuya longitud de onda es del mismo orden de magnitud que la separación entre átomos del cristal.

$$2d\text{sen}\theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

- En aberturas circulares (5): El patrón de difracción producido por una abertura circular de diámetro  $D$  consiste en una mancha central brillante, llamada disco de Airy, y una serie de anillos concéntricos oscuros y brillantes. La ecuación la proporciona el radio angular  $\theta_1$  del primer anillo oscuro, que es igual al tamaño angular del disco de Airy.

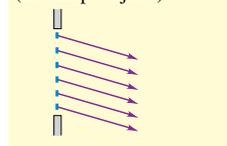
$$\text{sen}\theta_1 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Difracción de Fresnel  
(de campo cercano)

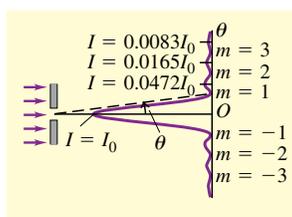


1

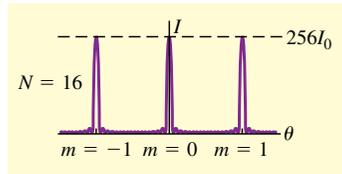
Difracción de Fraunhofer  
(de campo lejano)



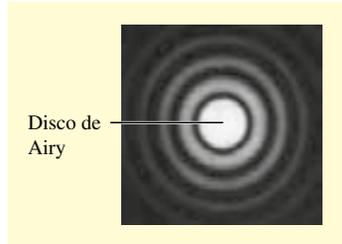
2



3



4



5

Figura 18. Tipos de difracción  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1259



## TEMA N.º 4: FÍSICA MODERNA

Denominada así porque en el siglo XX dos teorías nuevas revolucionan la física: por un lado, Plank da las bases de la teoría cuántica y, por otro lado, Einstein plantea la teoría de la relatividad. Estas teorías fueron base del desarrollo de nuevas teorías y desarrollo de nueva tecnología. Conozcamos un poco más de estos temas.

### 1. INVARIABILIDAD DE LAS LEYES FÍSICAS

---

Se basa en los principios de la relatividad que planteó Einstein y se expresan:

“Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales” (Young & Freedman, 2009, p. 1271). Esto significa que, si las leyes fueran distintas, significaría que hay un marco referencial para uno o que existe un marco referencial que es mejor que el otro. Esto lo explica bien este ejemplo:

Suponga que observa a dos niños que juegan a atrapar una pelota, mientras usted y los niños se hallan a bordo de un tren que avanza con velocidad constante. Sus observaciones del movimiento de la pelota no importa con cuánto cuidado las haga, no le pueden indicar con qué rapidez (o si acaso) se mueve el tren. Esto se debe a que las leyes de Newton del movimiento son las mismas en todos los marcos inerciales. (Young & Freedman, 2009, p. 1269)

El segundo principio establece que la velocidad de la luz es la misma en todos los marcos referenciales.

Estos principios significaron cambios drásticos en la forma de ver las cosas. Se determinó que los sucesos que se dan al mismo tiempo para una persona puede que no sean simultáneos para otra persona, que cuando dos personas que se desplazan una con respecto a la otra miden un intervalo de tiempo o longitud, pero puede ser que no tengan los mismos resultados. Además, se determinó que no siempre el sentido común se cumplía en relación a la velocidad de la luz, que vista desde cualquier marco referencial es la misma.

### 2. RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

---

La medición de tiempos e intervalos de tiempo implica el concepto de simultaneidad. En un marco de referencia dado, un suceso es un acontecimiento con una posición y un tiempo definido. El problema fundamental de la medición de intervalos de tiempo es, en general, que dos sucesos que son simultáneos en un marco de referencia no lo son en un segundo marco que se desplaza con respecto al primero, aun cuando ambos sean marcos inerciales (Young & Freedman, 2009, p. 1272).

Según el principio de relatividad, ningún marco inercial de referencia es más correcto que cualquier otro para la formulación de leyes físicas. Cada observador está en lo correcto en su propio marco de referencia. En otras palabras, la simultaneidad no es un concepto absoluto. El que dos sucesos sean simultáneos depende del marco de referencia (Young & Freedman, 2009, p. 1273).

### 3. RELATIVIDAD DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO

---

En un marco de referencia específico, supongamos que ocurren dos sucesos en un mismo punto del espacio. El intervalo de tiempo entre estos sucesos, medido por un observador en reposo en este mismo marco (al cual denominamos el *marco en reposo* de este observador), es  $\Delta t_0$ . En estas condiciones, un observador en un segundo marco que se desplaza con rapidez constante  $u$  con respecto al marco en reposo medirá un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , donde:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (\text{dilatación del tiempo})$$

Recordemos que ningún observador inercial puede viajar a  $u = c$  y advertimos que  $\sqrt{1 - u^2/c^2}$  es imaginaria cuando  $u > c$ . Por lo tanto, la ecuación da resultados razonables solo cuando  $u < c$ . El denominador de la ecuación siempre es menor que 1; por ello,  $\Delta t$  siempre es mayor que  $\Delta t_0$ . En consecuencia, llamamos a este efecto dilatación del tiempo.

Se define como tiempo propio al intervalo de tiempo entre dos eventos medidos por un observador que ve que los acontecimientos ocurren en el mismo punto en el espacio. Por ejemplo, si un reloj está en movimiento respecto a un observador, parecerá que se retrasa en comparación con los relojes en la cuadrícula sincronizados en su marco de referencia.

Entonces, se podría decir que todos los procesos físicos, biológicos y químicos se retardan respecto de un reloj estacionario cuando dichos procesos ocurren en un marco en movimiento.

#### 4. RELATIVIDAD DE LA LONGITUD

El concepto de simultaneidad también se aplica a la distancia entre dos puntos y puede depender también del marco de referencia del observador. En ese sentido, las longitudes de los objetos en movimiento parecen contraerse en dirección este, así la longitud  $l$  en movimiento, será:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma} \quad (\text{contracción de la longitud})$$

$l_0$  es la longitud en reposo,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ , mientras  $u$  es velocidad y  $c$  velocidad de la luz.

Cuando  $u$  es muy pequeña, la expresión tiende a la longitud  $l_0$ .

Es bueno recordar que la longitud medida perpendicularmente a la dirección del movimiento no se contrae.

#### 5. MASA RELATIVISTA

“Si un cuerpo proporciona la energía  $E$  en la forma de radiación, su masa disminuye en  $E/c^2 \dots$ ”; a esta conclusión llega Einstein, aunque en un inicio se dedujo que para la energía luminosa, la equivalencia es universal, así como que las leyes de conservación de la energía y de la masa son una y la misma. También se estableció que la energía en un sistema de partículas antes de la interacción debe ser igual a la energía después de la interacción; en este caso la energía está dada por:

$$E_i = \frac{m_i c^2}{\sqrt{1 - \frac{u_i^2}{c^2}}} = \gamma m_i c^2$$

Así las reacciones nucleares se deben a la liberación de cantidades enormes de energía, acompañadas por cambio de masa.

## 6. TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ

Son transformaciones de carácter general que toman en cuenta el principio de relatividad, reemplazan a las transformaciones galileanas y se representan:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \gamma(x - ut)$$

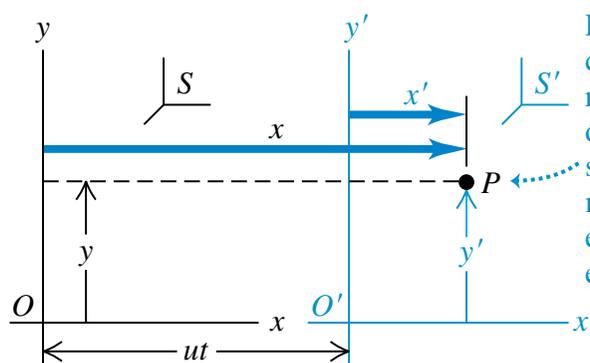
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \gamma(t - ux/c^2)$$

El marco  $S'$  se desplaza con respecto al marco  $S$  con velocidad constante  $u$  a lo largo del eje común  $x-x'$ .

Los orígenes  $O$  y  $O'$  coinciden en el tiempo  $t = 0 = t'$ .



La transformación de coordenadas de Lorentz relaciona las coordenadas de espacio-tiempo de un suceso medidas en los dos marcos:  $(x, y, z, t)$  en el marco  $S$  y  $(x', y', z', t')$  en el marco  $S'$ .

Figura 74. Transformaciones de Lorentz  
Fuente: Young & Freedman, 2009, p. 1284

Siendo  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ,  $x', y', z'$  coordenadas en el marco  $S'$  a velocidad constante  $u$ .

## 7. CANTIDAD DE MOVIMIENTO RELATIVISTA

El principio de conservación de la cantidad de movimiento afirma que cuando dos cuerpos interactúan, la cantidad de movimiento total es constante, siempre y cuando la fuerza externa neta que actúa sobre los cuerpos en un marco de referencia inercial sea cero (por ejemplo, si forman un sistema aislado en el que solo interactúan uno con otro). Si la conservación de la cantidad de movimiento es una ley física válida, debe ser válida en todos los marcos de referencia inerciales y, por lo tanto, la generalización de la cantidad de movimiento ( $p$ ) en una partícula que se mueve a una velocidad  $v$  estaría dada por:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{cantidad de movimiento relativista})$$

## 8. TRABAJO Y ENERGÍA RELATIVISTA

Para visualizar este tema recordemos que la energía total es la energía cinética más la potencial; además, la energía cinética de una partícula es igual al trabajo total realizado sobre ella al llevarla del reposo a la rapidez  $v$ :  $K = W$ , por esa razón la generalización de la energía cinética sería:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \quad (\text{energía cinética relativista})$$

Si  $v$  tiende a  $c$ , la energía cinética tiende al infinito.

Si consideramos que cuando la partícula está en reposo, la energía está dada por  $mc^2$ , podemos definir la energía total como:

$$E = K + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mc^2 \quad (\text{energía total de una partícula})$$

Si esta energía la representamos en función de la cantidad de movimiento quedaría:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 \quad (\text{energía total, energía en reposo y cantidad de movimiento})$$

## 9. MECÁNICA NEWTONIANA Y RELATIVIDAD

El principio de la relatividad ha originado cambios que llegan hasta las raíces mismas de la mecánica newtoniana, e incluyen los conceptos de longitud y tiempo, las ecuaciones del movimiento y los principios de conservación. Aunque la formulación newtoniana sigue siendo exacta siempre que la rapidez sea pequeña en comparación con la rapidez de la luz en el vacío. En tales casos, la dilatación del tiempo, la contracción de la longitud y las modificaciones de las leyes del movimiento son tan minúsculas que resulta imposible observarlas. De hecho, cada uno de los principios de la mecánica newtoniana sobrevive como un caso especial de la formulación relativista, de carácter más general.

“Las leyes de la mecánica newtoniana no son erróneas; están incompletas” (Young & Freedman, 2009, 1296). El principio de la relatividad lo que hace es generalizar las leyes no destruye ni desaparece la mecánica newtoniana, ya que estas se basan pruebas experimentales comprobadas, que son congruentes con lo que plantea la teoría.



## LECTURA SELECCIONADA N.º 1: INVISIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Leer el apartado: 2.1.1. Invisibilidad electromagnética (pp. 26-30).

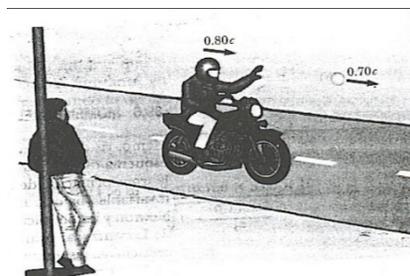
Ministerio de Defensa. (2011). Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa. Madrid: Autor. Disponible en <https://goo.gl/VirUYG>



## ACTIVIDAD FORMATIVA N.º 2

Analice los siguientes ejercicios y situaciones, utilizando los conocimientos aprendidos.

- Una vela de 4.85 cm de alto está 39.2 cm a la izquierda de un espejo plano. ¿Dónde el espejo forma la imagen y cuál es la altura de ésta?
- La imagen de un árbol cubre exactamente la longitud de un espejo plano de 4.00 cm de alto, cuando el espejo se sostiene a 35.0 cm del ojo. El árbol está a 28.0 m del espejo. ¿Cuál es su altura?
- Un objeto está a 24.0 cm del centro de un adorno esférico de vidrio plateado de árbol de Navidad con un diámetro de 6.00 cm. ¿Cuáles son la posición y el aumento de su imagen?
- Un espejo esférico cóncavo para afeitarse tiene un radio de curvatura de 32.0 cm. a) ¿Cuál es el aumento del rostro de una persona cuando está 12.0 cm a la izquierda del vértice del espejo? b) ¿Dónde está la imagen? ¿La imagen es real o virtual? c) Dibuje un diagrama de rayos principales para mostrar la formación de la imagen.
- Una partícula de tierra está incrustada a 3.50 cm bajo la superficie de una plancha de hielo ( $n = 1.309$ ). ¿Cuál es su profundidad aparente vista a una incidencia normal?
- Un haz de luz de 500nm de longitud de onda que viaja en el aire incide sobre una placa de material transparente. El haz incidente forma un ángulo de  $40^\circ$  con la normal y el haz refractado forma un ángulo de  $26^\circ$  con la normal. Determine índice de refracción del material.
- Una estación de radio que opera en la frecuencia de 1500 kHz ( $f = 1.5 \times 10^6$  Hz (cerca del extremo superior de la banda de difusión de AM) tiene dos antenas dipolares verticales idénticas que oscilan en fase y que se encuentran separadas por una distancia de 400 m. A distancias mucho mayores de 400 m, ¿en qué direcciones es máxima la intensidad en el patrón de radiación resultante? (Este no es un problema hipotético, ya que a menudo es deseable transmitir la mayor parte de la energía irradiada desde una transmisora de radio en ciertas direcciones y no de modo uniforme en todas direcciones. No es raro que se utilicen pares o filas de antenas para producir el patrón de radiación que se desea).
- Suponga que un motociclista que se mueve a una rapidez de  $0,8c$  con respecto a un observador estacionario, como se muestra en la figura. Si el motociclista lanza una pelota hacia adelante a una rapidez de  $0,7c$  relativa a sí mismo, ¿cuál es la rapidez de la pelota según el observador estacionario?





## GLOSARIO DE LA UNIDAD IV

---

E

### EVENTO

Ocurrencia que puede describirse por medio de tres coordenadas espaciales y una coordenada de tiempo (Serway, 1995).

F

### FRENTE DE ONDA

Son planos paralelos que se desplazan en la dirección de propagación de una onda plana y contiene al campo eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí, de igual valor en magnitud y longitud de onda (Young & Freedman, 2009).

N

### NÚMERO DE ONDA (K)

Número de longitudes de onda en una distancia ( $K=2\pi/\lambda$ ) (Serway, 1995).

T

### TRANSFORMACIONES GALILEANAS

Ecuaciones basadas en las nociones newtonianas de espacio tiempo (Young & Freedman, 2009).



## BIBLIOGRAFÍA DE LA UNIDAD IV

---

Ramos, F. (2010). *Física: Teoría y práctica*. Lima: Empresa editora Macro E.I.R.L.

Serway, R. A. (1995). *Física*. Tomo II. México: Mc Graw Hill.

Ministerio de Defensa. (2011). *Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa*. Madrid: Autor. Disponible en <http://bit.ly/2auiqYb>

Young, H. & Freedman, R. (2009). *Física universitaria con física moderna* (12ª ed., Vols. 1-2). México: Pearson Educación. Volumen 1 disponible en <http://fis.ucv.cl/docs/Fis231/textos/Fisica-Universitaria-Sears-Zemansky-12va-Edicion-Vol1.pdf> y volumen 2 en [https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi\\_blog/r/Fisica\\_General\\_-\\_Fisica\\_Universitaria\\_Vol\\_2\\_ed\\_12\(Sears-Zemansky\).pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a-3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2_ed_12(Sears-Zemansky).pdf)



## AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD IV

Resuelve los siguientes ejercicios aplicando los conceptos aprendidos en esta unidad. (Cada pregunta vale 2 puntos).

1. La placa en la parte posterior de una computadora personal indica que toma 2.7 A de una línea de 120 V y 60 Hz. Para esta computadora, ¿cuál es el valor de la corriente media?
  - a) 0 A
  - b) 2 A
  - c) -3 A
  - d) 3.8 A
2. Suponga que se desea que la amplitud de la corriente en un inductor de un receptor de radio sea de 250  $\mu\text{A}$  cuando la amplitud del voltaje es de 3.60 V a una frecuencia de 1.60 MHz (correspondiente al extremo superior de la banda de transmisión de AM). ¿Cuál es la reactancia inductiva que se necesita?
  - a) 12.2  $\text{K}\Omega$
  - b) 6  $\text{K}\Omega$
  - c) 14.4  $\text{K}\Omega$
  - d) 20  $\text{K}\Omega$
3. En un circuito R-L-C en donde  $X_L > X_C$ , el voltaje a través del inductor:
  - a) Se retrasa a la corriente 90 grados
  - b) Se adelanta a la resistencia
  - c) Está en fase con la corriente
  - d) Se adelanta a la corriente 90 grados.
4. Una secadora eléctrica para el cabello está especificada a 1500 W y 120 V. La potencia nominal de esta secadora de cabello, o de cualquier otro dispositivo de ca, es la potencia media que consume, y el voltaje nominal es el voltaje eficaz (rms). Calcule la corriente rms eficaz.
  - a) 15 A
  - b) 12.5 A
  - c) 8.5 A
  - d) 9.7 A

5. Una amiga trae de Europa un aparato que, según ella, es la mejor cafetera del mundo. Por desgracia, el aparato está diseñado para operar en una línea de 240 V y obtener los 960 W de potencia que necesita. ¿Qué puede hacer nuestra amiga para utilizar la cafetera a 120 V?
- Debe usar un transformador cuya bobina secundaria debe tener el triple de espiras que la bobina primaria
  - Puede usarlo sin transformador
  - Debe usar un transformador cuya bobina primaria debe tener el doble de espiras que la bobina secundaria.
  - Debe usar un transformador cuya bobina secundaria debe tener el doble de espiras que la bobina primaria
6. La teoría cuántica presupone que la luz:
- Se comporta como un rayo lineal
  - Se comporta como una onda
  - Presenta un aspecto corpuscular en forma de paquetes llamados fotones
  - Se comporta como una onda electromagnética.
7. Una persona con miopía es incapaz de ver objetos claramente cuando están más allá de 2.5m. ¿Cuál debe ser la longitud focal del lente prescrito para corregir este problema?
- 2.5 m
  - 2.5 m
  - 0,5 m
  - 0,9 m
8. Determine la altura mínima de un espejo plano vertical en el cual una persona de 5pies 10pulg de estatura podría ver su imagen completa.
- 2 pies 11 pulgadas
  - 3 pies
  - 1,5 pies 2 pulgadas
  - 4 pulgadas
9. En una intersección de pasillo de hospital se coloca un espejo convexo alto en una pared para ayudar a que la gente evite choques. El espejo tiene un radio de curvatura de 0,55m. Determine el aumento.
- 2,3
  - 0,56

c) 0,026

d) 0,78

10. El primer principio de la relatividad de Einstein establece lo siguiente:

- a) Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales.
- b) La rapidez de la luz en un vacío es la misma en todos los marcos de referencia inerciales y es independiente del movimiento de la fuente.
- c) La fuerza es igual a la masa por aceleración.
- d) La rapidez en sistema es igual que en otro a diferente velocidad.



## ANEXO 1:

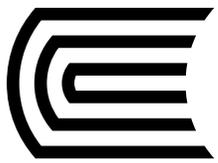
## SOLUCIONARIO DE LAS AUTOEVALUACIONES

AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD I	
NÚMERO	RESPUESTA
1	a
2	b
3	c
4	a
5	a
6	a
7	b
8	c
9	c
10	c

AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD II	
NÚMERO	RESPUESTA
1	a
2	b
3	b
4	d
5	c
6	b
7	c
8	d
9	a
10	b

AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD III	
NÚMERO	RESPUESTA
1	b
2	c
3	d
4	a
5	b
6	d
7	a
8	a
9	d
10	c

AUTOEVALUACIÓN DE LA UNIDAD IV	
NÚMERO	RESPUESTA
1	a
2	c
3	d
4	b
5	d
6	c
7	a
8	a
9	c
10	a



## MANUAL AUTOFORMATIVO INTERACTIVO

Este manual autoformativo es el material didáctico más importante de la presente asignatura. Elaborado por el docente, orienta y facilita el auto aprendizaje de los contenidos y el desarrollo de las actividades propuestas en el sílabo.

Los demás recursos educativos del aula virtual complementan y se derivan del manual. Los contenidos multimedia ofrecidos utilizando videos, presentaciones, audios, clases interactivas, se corresponden a los contenidos del presente manual. La educación a distancia en entornos virtuales te permite estudiar desde el lugar donde te encuentres y a la hora que más te convenga. Basta conectarse al Internet, ingresar al campus virtual donde encontrarás todos tus servicios: aulas, videoclases, presentaciones animadas, bi-

blioteca de recursos, muro y las tareas, siempre acompañado de tus docentes y amigos.

El modelo educativo de la Universidad Continental a distancia es innovador, interactivo e integral, conjugando el conocimiento, la investigación y la innovación. Su estructura, organización y funcionamiento están de acuerdo a los estándares internacionales. Es innovador, porque desarrolla las mejores prácticas del e-learning universitario global; interactivo, porque proporciona recursos para la comunicación y colaboración síncrona y asíncrona con docentes y estudiantes; e integral, pues articula contenidos, medios y recursos para el aprendizaje permanente y en espacios flexibles. Ahora podrás estar en la universidad en tiempo real sin ir a la universidad.

