



INSTITUCIÓN

Instituto Tecnológico de la Costa Grande

CARRERA

Ingeniería Electromecánica

APUNTES DE LA ASIGNATURA

Electricidad y Magnetismo

Docente

M. en C. Tomás Muñiz Vera

Fecha

31 de agosto 2024



Manzana 30, Lote 1, Col. El Limón, C.P. 40880, Zihuatanejo, Gro.

Tels. 755-554-48-51, 755-554-48-52, 755-554-54-87,

E-mail: dir_costagrande@tecnm.mx

www.itcostagrande.edu.mx

CONTRIBUCIÓN ACADÉMICA

Es importante que el Tecnológico Nacional de México cuente con apuntes de las materias que integran las diferentes retículas con Complementos Educativos como los de Ejercicios Prácticos, Aplicaciones en Software, Recursos Electrónicos de Apoyo, Estudios de Caso, Aprendizaje Basados en Retos y Problemas de elaboración propia que indica en el programa de trabajo, para facilitar al docente herramientas y material didáctico al momento de impartir estas. El beneficio principal de tener apuntes de cada materia revisados y avalados por las academias es que los conocimientos que se imparten se estandarizarán a todo el sistema, esto garantizaría un nivel de educación de calidad y competitividad. El desarrollo e implementación de material educativo, llámese apuntes, complemento educativo, ejercicios prácticos, aplicaciones de software, recursos electrónicos de apoyo, estudios de caso, aprendizaje basado en retos y problemas de elaboración propia que se indica en el programa de trabajo deben suscribirse en la actualidad al desarrollo no sólo del contexto local, sino considerando los retos nacionales e internacionales que demanda el sistema laboral. Otro beneficio al tener apuntes de las materias que conforman las diferentes retículas de las carreras que ofrece el sistema es la medición de los impactos de los procesos de autoevaluación y acreditación de los programas de estudio, así como el análisis de los modelos de evaluación.

Los apuntes de la asignatura de *Electricidad y Magnetismo*, aporta al perfil del Ingeniero Electromecánico la capacidad para conocer y comprender las Leyes y Principios de la Electricidad y Magnetismo, que constituyen la columna vertebral de los principios de funcionamiento de las Maquinas Eléctricas rotativas (Máquina de CD, Máquina de Inducción y Máquina Síncrona) y estática (Transformador), así como el aprendizaje de los variables básicas de la electricidad Resistencia, Voltaje y Corriente, que se estudian en los circuitos de corriente directa y corriente alterna y tienen amplia aplicación en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

ÍNDICE

Contenido

CONTRIBUCIÓN ACADÉMICA	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
UNIDAD 1 Electrostática.	10
1.1 Introducción histórica del Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología.....	11
1.2 Definición de Electrostática	12
1.3 La carga eléctrica y sus propiedades.....	13
1.4 Aislantes, conductores, semiconductores y superconductores.	15
1.5 Ley de Coulomb.....	16
1.6 Ley de Gauss y sus aplicaciones	23
1.7 Definición de Potencial Eléctrico	27
1.8 Cálculo de Potencial Eléctrico	30
1.9 Diferencia de Potencial	33
1.10 Aplicaciones	35
UNIDAD 2 Capacitancia.....	37
2.1 Definición de Capacitancia.....	37
2.2 Capacitor de placas paralelas.....	40
2.3 Capacitor cilíndrico	42
2.4 Dieléctricos.....	43
2.5 Capacitores en serie y paralelo	46
2.6 Capacitores serie-paralelo	51
2.7 Energía almacenada en un capacitor	54
UNIDAD 3 Electrodinámica	56
3.1 Corriente eléctrica	56
3.2 Fuentes de fuerza electromotriz: pilas y baterías.....	61
3.3 Resistencia	63
3.3.1 Resistividad	65

3.3.2 Factores que afectan la resistividad.....	65
3.3.3 Código de colores.....	70
3.3.4 Resistencia en serie y en paralelo.....	73
3.4 Ley de Ohm	82
3.5 Leyes de Kirchhoff.....	85
3.6 Divisor de corriente y de voltaje	91
3.7 Energía eléctrica y potencia	97
3.7.1 Ley de Joule.....	100
3.7.2 Potencia eléctrica.....	102
3.8 Elección e inicio de Proyecto	104
UNIDAD 4 Campo Magnético.....	105
4.1 Conceptos: Magnetismo, campo magnético y flujo magnético	105
4.2 Materiales magnéticos y sus propiedades. Histéresis	111
4.3 Generación de campos magnéticos. Ley de Biot–Savart	118
4.4 Fuerza magnética sobre una carga	124
4.5 Fuerza magnética y par sobre un conductor que conduce corriente.....	127
4.6 Fuerza magnética entre conductores paralelos.....	129
4.7 Ley de Faraday	131
4.8 Ley de Lenz.....	135
4.9 Introducción a Leyes de Maxwell.....	138
4.10 Seguimiento al proyecto seleccionado	140
UNIDAD 5 Inducción Electromagnética	141
5.1 Definición de inductancia.....	141
5.2 Enlaces de flujo	145
5.3 Energía asociada al campo magnético.....	146
5.4 Inductancia mutua	148
5.5 Conclusión y revisión del proyecto seleccionado	151
REFERENCIAS.....	152
INSTRUMENTACIÓN DIDÁCTICA	155
CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECNIM	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Experimentos de electrostática. a) Los objetos cargados negativamente se repelen entre sí. b) Los objetos cargados positivamente se repelen entre sí. c) Los objetos con carga positiva se atraen con los objetos que tienen carga negativa.	14
Figura 2 Ley de Coulomb.....	17
Figura 3 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga que está colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.	20
Figura 4 Representación de las cargas, ejemplo 2.....	22
Figura 5 La intensidad del campo eléctrico a una distancia r de las cargas puntuales es directamente proporcional al número de líneas ΔN que penetran por unidad ΔA de una superficie esférica construida en esa distancia.....	24
Figura 6 Cálculo del campo fuera de una placa infinita de carga positiva.....	26
Figura 7 Cálculo del potencial a una distancia r de una carga $+Q$	28
Figura 8 Potencial eléctrico en la vecindad de cierto número de cargas.	31
Figura 9 Representación ejemplo 2.	32
Figura 10 Un condensador consta de conductores, aislados, con la misma carga, pero opuesta.	38
Figura 11 Capacitor de placas paralelas.....	40
Figura 12 Capacitor cilíndrico o coaxial	42
Figura 13 Un tipo común de capacitor utiliza láminas dieléctricas para separar los conductores.	44
Figura 14 Efecto de un dieléctrico entre las placas paralelas de un capacitor. a) Con una carga dada, la diferencia de potencial es V_0 . b) Con la misma carga, pero con un dieléctrico entre las placas, la diferencia de potencial V es menor que V_0	45
Figura 15 Definición de los símbolos más usados al trabajar con capacitores.....	47
Figura 16 Cálculo de la capacitancia equivalente de un grupo de capacitores conectados en serie.	47
Figura 17 Capacitancia equivalente de un conjunto de condensadores conectados en paralelo.	49
Figura 18 Simplificación de un problema sustituyendo valores equivalentes por capacitancia.	52
Figura 19 Si no hay campo eléctrico en el interior de un conductor, no habrá circulación de electrones.	58
Figura 20 Corriente real y corriente convencional.	59
Figura 21 La corriente I es la tasa de transferencia de carga a través del área de sección transversal A .60	60
Figura 22 Corte seccional de una pila seca.	61
Figura 23 Conexión de pilas en serie $V_T = V_1 + V_2 + V_3 = 4.5 V$	62
Figura 24 Conexión de pilas en paralelo $V_T = V_1 = V_2 = V_3 = 1.5 V$	62
Figura 25 (a) Diagrama de un circuito que permite estudiar la ley de Ohm. (b) Diagrama ilustrativo que	64
Figura 26 La resistencia de un alambre depende de la clase de material, su longitud, el área de su sección transversal y su temperatura.....	66
Figura 27 Configuración de resistencia eléctrica.	70
Figura 28 Un circuito eléctrico simple.	73
Figura 29 (a) Resistencias conectados en serie, (b) Resistencias no conectados en serie.	74

Figura 30 Método del voltímetro-amperímetro para medir la resistencia efectiva de varias resistencias conectadas en serie.	75
Figura 31 Las resistencias R_2 y R_3 están conectadas en paralelo.	78
Figura 32 Cálculo de la resistencia equivalente de cierto número de resistencias conectadas en paralelo.	78
Figura 33 Reducción de un circuito complejo a un circuito equivalente simple.	81
Figura 34 (a) Diagrama de un circuito que permite estudiar la ley de Ohm. (b) Diagrama ilustrativo que muestra de qué modo se conectan los diversos elementos de un circuito en el laboratorio.	84
Figura 35 Dos redes que no pueden reducirse a combinaciones simples de resistores en serie o en paralelo.	85
Figura 36 a) La regla de Kirchhoff de las uniones dice que la cantidad de corriente que llega a una unión es igual a la que sale. b) Analogía con una tubería de agua.	87
Figura 37 Uso de las convenciones de signos cuando se aplica la regla de Kirchhoff de las espiras. En cada parte de la figura "Recorrido" es el sentido en que imaginamos ir alrededor de la espira, que no necesariamente es el sentido de la corriente.	88
Figura 38 Circuito del ejemplo	89
Figura 39 Divisor de corriente.	92
Figura 40 Divisor de voltaje.	95
Figura 41 La potencia de alimentación al elemento de circuito entre a y b es $P = Va - Vbl = Vabl$. .98	98
Figura 42 a) Dos imanes de barra se atraen cuando sus polos opuestos (N y S, o S y N) están cerca uno del otro. b) Los imanes de barra se repelen cuando sus polos iguales (N y N, o S y S) se aproximan entre sí.	106
Figura 43 a) Cualquiera de los polos de un imán de barra atrae a un objeto no magnetizado que contenga hierro, como un clavo. b) Ejemplo de este efecto en la vida real.	107
Figura 44 (a) Las líneas de flujo magnético están en la dirección de la fuerza que se ejerce sobre un polo norte independiente, (b) Las líneas de flujo cercanas a una barra imantada.	108
Figura 45 (a) Líneas de flujo magnético entre dos polos magnéticos diferentes, (b) Líneas de flujo magnético entre dos polos iguales.	108
Figura 46 De igual forma en que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de líneas del campo eléctrico, el campo magnético es proporcional a la densidad de las líneas de flujo del campo magnético.	109
Figura 47 Cálculo del flujo magnético a través de una espira rectangular.	110
Figura 48 De una fotografía con aumento, las flechas señalan las direcciones de magnetización en los dominios de un solo cristal de níquel. Los dominios que están magnetizados en la dirección de un campo magnético aplicado crecen.	115
Figura 49 Curva de magnetización para un material ferromagnético. La magnetización M se aproxima a su valor de saturación M_{sat} conforme el campo magnético B_0 (generado por corrientes externas) aumenta.	116
Figura 50 Ciclos de histéresis. Los materiales en los incisos a) y b) permanecen muy magnetizados cuando B_0 se reduce a cero. Como el material de a) también es difícil de desmagnetizar, sería adecuado para imanes permanentes. Puesto que el material de b) se magnetiza y desmagnetiza con más facilidad, podría usarse como material para memorias de computadoras. El material de c) sería útil para los transformadores y otros dispositivos de corriente alterna en los que sería óptima una histéresis de cero.	117

Figura 51 a) Vectores de campo magnético debidos a una carga puntual positiva en movimiento, q . En cada punto, es perpendicular al plano de y B S r S v S , y su magnitud es proporcional al seno del ángulo entre ellos. b) Las líneas de campo magnético en un plano contienen a la carga positiva en movimiento.	119
Figura 52 a) Vectores del campo magnético debido a un elemento de corriente b) Líneas de campo magnético en un plano que contiene el elemento de corriente Compare esta figura con la 28.1 para el campo de una carga puntual en movimiento.	120
Figura 53 Campo magnético producido por un conductor recto portador de corriente de longitud $2a$.122	122
Figura 54 Campo magnético producido por un conductor recto portador de corriente de longitud $2a$.123	123
Figura 55 La fuerza magnética F sobre una carga en movimiento es perpendicular tanto a la densidad de flujo B como a la velocidad de carga v	124
Figura 56 Uso de las reglas de la mano derecha y la mano izquierda para determinar la dirección de la fuerza magnética en una carga en movimiento.	125
Figura 57 La magnitud de la fuerza magnética adquiere su valor máximo cuando la trayectoria es perpendicular al campo y su valor mínimo cuando es paralela al mismo.	126
Figura 58 La fuerza magnética en una carga positiva que se mueve a 30° respecto al campo B	126
Figura 59 Fuerza magnética sobre un conductor por el cual fluye una corriente.	128
Figura 60 La fuerza magnética sobre un conductor por el cual circula una corriente. La corriente está dirigida a un ángulo θ respecto al campo B	128
Figura 61 Los conductores paralelos que transportan corrientes en el mismo sentido se atraen uno al otro. Los diagramas muestran cómo el campo magnético B causado por la corriente del conductor inferior ejerce una fuerza F sobre el conductor superior.	129
Figura 62 Cuando un conductor corta líneas de flujo magnético se induce una corriente eléctrica.	131
Figura 63 La fem inducida en una bobina es proporcional al número de espiras de alambre que cruzan a través del campo.	132
Figura 64 (a) Inducción de una corriente por medio del movimiento de un imán que se desplaza dentro de una bobina, (b) Una corriente variable que circula por la bobina A induce una corriente en la bobina B.	134
Figura 65 Movimiento de barra sobre rieles paralelos en un campo magnético.	136
Figura 66 Imán de barra se introduce en espira estacionaria.	137
Figura 67 El inductor.	142
Figura 68 Circuito para estudiar la inductancia.	143
Figura 69 Elevación y decaimiento de la corriente en un inductor.	144
Figura 70 Circuito que contiene una fuente de fem y un inductor. La fuente es variable, por lo que la corriente i y su tasa de cambio di/dt pueden variarse.	146
Figura 71 La corriente en la bobina i_1 da origen a un flujo magnético a través de la bobina 2.	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descomposición de los vectores.....	23
Tabla 2 Valores de la constante dieléctrica, K a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	46
Tabla 3 Fórmulas para los capacitores conectados en serie y en paralelo.	51
Tabla 4 Resistividades y coeficientes de temperatura a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Tabla 5 Código de Colores para resistencias de 4 bandas.....	71
Tabla 6 Valores de Tolerancia.....	71
Tabla 7 Valores Comerciales de Resistencias.	72
Tabla 8 Susceptibilidades magnéticas de materiales paramagnéticos y diamagnéticos a $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	114

INTRODUCCIÓN

La Electricidad y el Magnetismo cobra gran importancia debido a que casi todos los dispositivos que utilizamos cotidianamente funcionan con energía eléctrica.

Además, actualmente vivimos en la era de las telecomunicaciones donde las personas nos mantenemos comunicadas en todos los lugares en los que nos encontramos, y para esto utilizamos las redes de comunicación telefónicas o el internet, los cuales basan su funcionamiento en el espectro electromagnético.

Es decir, ya es imposible imaginar la vida sin energía eléctrica, la cual ha invadido todas las esferas de la actividad humana: la industria y la agricultura, la ciencia, el espacio y nuestra vida cotidiana.

Aquí la importancia de que nuestros Estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica, conozcan las Leyes y Principios de la Electricidad y del Magnetismo que rigen los principios de funcionamiento de todas las máquinas eléctricas, electrónicas y digitales, que permiten el desarrollo científico, tecnológico, cibernético y de servicios.

DESARROLLO

UNIDAD 1 Electrostática.

Competencias

Específica:

- Resuelve problemas relacionados con los conceptos de carga eléctrica, campo eléctrico y diferencia de potencial
- Demuestra prácticamente la existencia de las cargas eléctricas, el campo eléctrico, la diferencia de potencial, las líneas de campo
- Describe el significado de la ley de Coulomb.

Genéricas:

- Capacidad de organizar y planificar
- Trabajo en equipo
- Capacidad de aplicar conocimientos en la práctica

1.1 Introducción histórica del Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología

Ahora se inicia el estudio de la rama de la física a la cual conciernen los fenómenos eléctricos y magnéticos. Las leyes de la electricidad y magnetismo desempeñan un papel central en la comprensión del funcionamiento de varios dispositivos como los radios, las televisiones, los motores eléctricos, computadoras, aceleradores de alta energía y otros dispositivos electrónicos que se utilizan en medicina. Sin embargo, fundamentalmente, ahora se sabe que las fuerzas interatómicas e intermoleculares, que son las responsables de la formación de sólidos y líquidos, son de origen eléctrico. Además, fue como las de repulsión y de atracción entre objetos y la fuerza elástica en un resorte provienen de las fuerzas eléctricas a nivel atómico.

Evidencias en documentos chinos sugieren que el magnetismo fue conocido a principios del año 2000 A.C. Los antiguos griegos observaron los fenómenos eléctricos y magnéticos posiblemente a principios del año 700 A.C. Descubrieron que un pedazo de ámbar frotado se electrificaba y era capaz de atraer trozos de paja o plumas. La existencia de la fuerza magnética se conoció al observar que pedazos de roca natural llamada magnetita (Fe_3O_4) atraen al hierro. (La palabra eléctrico viene del vocablo griego para el ámbar, elektron. La palabra magnética viene del nombre de un distrito central al norte de Grecia donde se descubrió, Magnesia)

En 1600, William Gilbert descubre que la electrificación no estaba limitada al ámbar, sino que éste es un fenómeno general. Así, científicos electrificaron una variedad de objetos, ¡incluyendo a gallinas y personas! Experimentos realizados por Charles Coulomb en 1785 confirmaron la ley del inverso del cuadrado para la electricidad.

Hasta principios del siglo XIX los científicos establecieron que la electricidad y el magnetismo son, en efecto, fenómenos relacionados. En 1820 Hans Oersted descubre que una brújula se defleca cuando se coloca cerca de un circuito que lleve corriente eléctrica. En 1831, Michael Faraday y simultáneamente, Joseph Henry, demuestran que, cuando un alambre se mueve cerca de un magneto o imán (o de manera equivalente, cuando un magneto se mueve cerca de un alambre), una corriente eléctrica se observa en el alambre. En 1873, James Clerk Maxwell usó estas observaciones y otros factores experimentales como base y formula las leyes del electromagnetismo que conocemos actualmente. (Electromagnetismo es el nombre dado a la combinación de los campos eléctrico y magnético.) Poco tiempo después (alrededor de 1888),

Heinrich Hertz verifica las predicciones de Maxwell produciendo ondas electromagnéticas en el laboratorio. Esto fue seguido por desarrollos prácticos como el radio y la televisión.

Las contribuciones de Maxwell a la ciencia del electromagnetismo fueron especialmente significativas debido a que las leyes formuladas por Él son básicas para todas las formas de los fenómenos electromagnéticos. Su trabajo es comparable en importancia al descubrimiento de Newton con sus leyes del movimiento y la teoría de la gravitación. [1]

1.2 Definición de Electroestática

La electrostática es la ciencia que estudia las cargas en reposo. Hemos visto que existen dos tipos de cargas en la naturaleza. Si un objeto tiene un exceso de electrones, se dice que está cargado negativamente; si tiene una deficiencia de electrones, está cargado positivamente. La ley de Coulomb fue presentada para proveer una medida cuantitativa de las fuerzas eléctricas que existen entre esas cargas. Los principales conceptos se mencionan a continuación.

- La primera ley de la electrostática establece que las cargas del mismo signo se repelen entre sí y las cargas de diferente signo se atraen unas a otras.
- La segunda de la electrostática es conocida como la Ley de Coulomb y establece que la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (separación) entre las dos cargas.

$$F = \frac{kqq'}{r^2} \text{ Ley de Coulomb}$$

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

La fuerza F está en newtons (N) cuando la distancia r está en metros (m) y la carga q se mide en Coulombs (C).

- Al resolver los problemas de este tema, es importante usar el signo de las cargas para determinar la dirección de las fuerzas y la ley de Coulomb para determinar sus magnitudes. La fuerza resultante sobre una carga en particular se calcula con los métodos de la mecánica vectorial. [1]

1.3 La carga eléctrica y sus propiedades

En una época tan remota como 600 A.C., los griegos de la antigüedad descubrieron que cuando frotaban ámbar contra lana, el ámbar atraía otros objetos. En la actualidad decimos que con ese frotamiento el ámbar adquiere una carga eléctrica neta o que se carga. La palabra “eléctrico” se deriva del vocablo griego elektron, que significa ámbar. Cuando al caminar una persona frota sus zapatos sobre una alfombra de nailon, se carga eléctricamente; también carga un peine si lo pasa por su cabello seco.

Las varillas de plástico y un trozo de piel (verdadera o falsa) son especialmente buenos para demostrar la electrostática, es decir, la interacción entre cargas eléctricas en reposo (o casi en reposo). La figura 1a muestra dos varillas de plástico y un trozo de piel. Observamos que después de cargar las dos varillas frotándolas contra un trozo de piel, las varillas se repelen.

Cuando frotamos varillas de vidrio con seda, las varillas de vidrio también se cargan y se repelen entre sí (figura 1b). Sin embargo, una varilla de plástico cargada atrae otra varilla de vidrio también cargada; además, la varilla de plástico y la piel se atraen, al igual que el vidrio y la seda (figura 1c).

Estos experimentos y muchos otros parecidos han demostrado que hay exactamente dos tipos de carga eléctrica: la del plástico cuando se frota con piel y la del vidrio al frotarse con seda. Benjamín Franklin (1706-1790) sugirió llamar a esas dos clases de **carga negativa y positiva**, respectivamente, y tales nombres aún se utilizan. La varilla de plástico y la seda tienen carga negativa; en tanto que la varilla de vidrio y la piel tienen carga positiva.

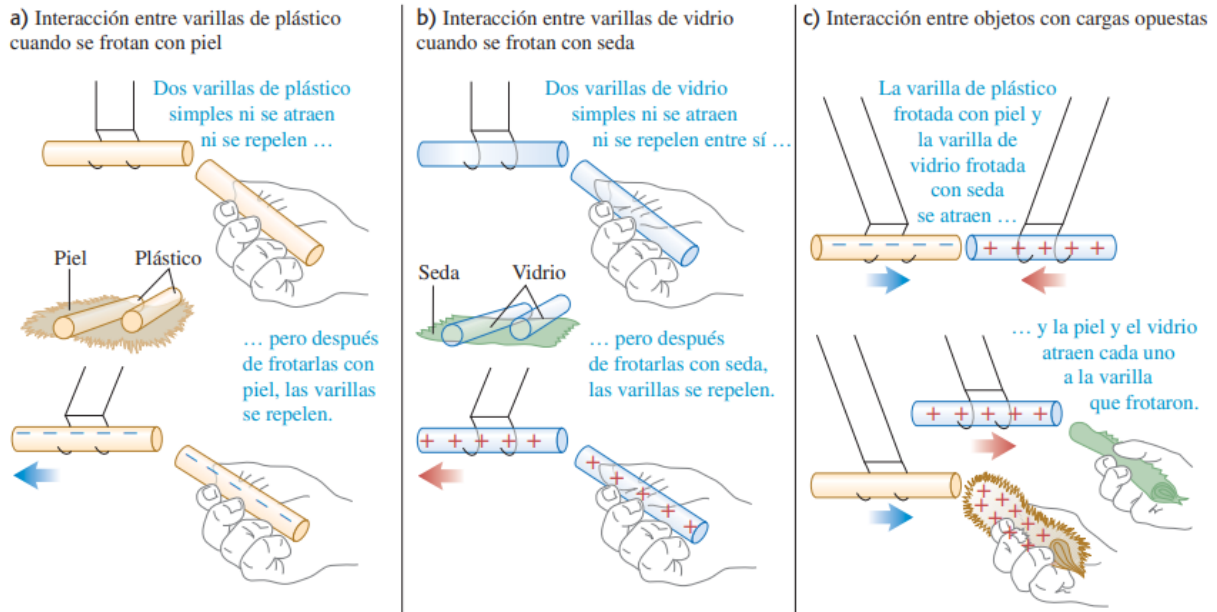


Figura 1 Experimentos de electrostática. a) Los objetos cargados negativamente se repelen entre sí. b) Los objetos cargados positivamente se repelen entre sí. c) Los objetos con carga positiva se atraen con los objetos que tienen carga negativa.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and zemansky's university physics, volume 2: Electricity & magnetism, optics, relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Dos cargas positivas se repelen entre sí, al igual que dos cargas negativas. Una carga positiva y una negativa se atraen. [2]

La carga eléctrica se mide en Coulombs.

El electrón tiene una carga eléctrica de $-1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ coulomb.

El protón tiene una carga eléctrica de $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ coulomb.

1.4 Aislantes, conductores, semiconductores y superconductores.

Es conveniente clasificar las sustancias en términos de su capacitancia para conducir carga eléctrica.

Los **conductores** son los materiales en los cuales las cargas eléctricas se mueven con bastante libertad, en tanto que son aisladores los que no transportan la carga con facilidad

Materiales como el vidrio, caucho y la lucita están dentro de la categoría de **aisladores**. Cuando estos materiales son cargados por frotamiento, sólo el área que se frota se carga y ésta no se mueve hacia otras regiones del material.

En contraste, materiales como el cobre, el aluminio y la plata son buenos conductores. Cuando estos materiales se cargan en alguna pequeña región, la carga rápido se distribuye sobre toda la superficie del conductor. Si se sostiene una barra de cobre con la mano y se frota con lana o cualquier piel, la barra no atraerá un pequeño pedazo de papel. Esto podría sugerir que no se puede cargar un metal. Por otro lado, si se sostiene la barra de cobre con un mango de lucita y después se frota, la barra permanecerá cargada y atraerá al trozo de papel. Esto se puede explicar al observar que, en el primer caso, la carga eléctrica producida por frotamiento pasa con facilidad del cobre a nuestra mano y finalmente, hacia la tierra. En el segundo caso, el mango aislador de lucita evita el flujo de la carga hacia la tierra.

Los **semiconductores** constituyen una tercera clase de materiales, y sus propiedades eléctricas se encuentran entre las correspondientes a los aislantes y los conductores. El silicio y el germanio son ejemplos bien conocidos de semiconductores que se utilizan con frecuencia en la fabricación de una variedad de dispositivos electrónicos. Las propiedades eléctricas de los semiconductores pueden ser cambiadas en varios órdenes de magnitud, agregando cantidades controladas de átomos extraños a los materiales. Cuando un conductor se conecta a tierra por medio de un alambre conductor o de un tubo de cobre, se dice que está aterrizado. La tierra puede considerarse como un sumidero infinito hacia el cual los electrones pueden emigrar con facilidad. Con esto en mente, se puede comprender cómo cargar un conductor por un proceso conocido como inducción. [3]

La superconductividad fue descubierta por primera vez en 1911 por el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes. Mientras experimentaba con mercurio a una temperatura cercana al cero absoluto ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $0\text{ }^{\circ}\text{K}$), observó que la resistencia del material caía a cero. Este descubrimiento marcó el inicio de una intensa investigación en el campo.

La superconductividad tiene aplicaciones potenciales en una amplia variedad de campos, como la medicina, la tecnología de transporte y la generación de energía. Los dispositivos como los imanes superconductores utilizados en la resonancia magnética (MRI) y los trenes de levitación magnética son ejemplos concretos de la aplicación de este fenómeno.

En resumen, los **superconductores** ofrecen oportunidades emocionantes en diversas áreas de la tecnología y la ciencia, pero su uso aún enfrenta desafíos, especialmente en lo que respecta a la necesidad de bajas temperaturas para su funcionamiento. [4]

1.5 Ley de Coulomb

Como de costumbre, la tarea del físico consiste en medir de forma cuantitativa las interacciones entre los objetos cargados. No es suficiente con establecer que existe una fuerza eléctrica; debemos ser capaces de predecir su magnitud.

La primera investigación teórica acerca de las fuerzas eléctricas entre cuerpos cargados fue realizada por Charles Augustin de Coulomb en 1784. Él llevó a cabo sus investigaciones con una balanza de torsión para medir la variación de la fuerza con respecto a la separación y la cantidad de carga. La separación r entre dos objetos cargados se define como la distancia en línea recta entre sus respectivos centros. La cantidad de carga q se puede considerar como el número de electrones o de protones que hay en exceso, en un cuerpo determinado.

Coulomb encontró que la fuerza de atracción o de repulsión entre dos objetos cargados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En otras palabras, si la

distancia entre dos objetos cargados se reduce a la mitad, la fuerza de atracción o de repulsión entre ellos se cuadruplicará.

El concepto de cantidad de carga no se comprendía con claridad en la época de Coulomb. No se había establecido aún la unidad de carga y no había forma de medirla, pero en sus experimentos se demostraba claramente que la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados es directamente proporcional al producto de la cantidad de carga de cada objeto. Actualmente, estas conclusiones se enuncian en la ley de Coulomb:

La fuerza de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional el producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Para lograr la expresión matemática de la ley de Coulomb consideremos las cargas de la figura 2.

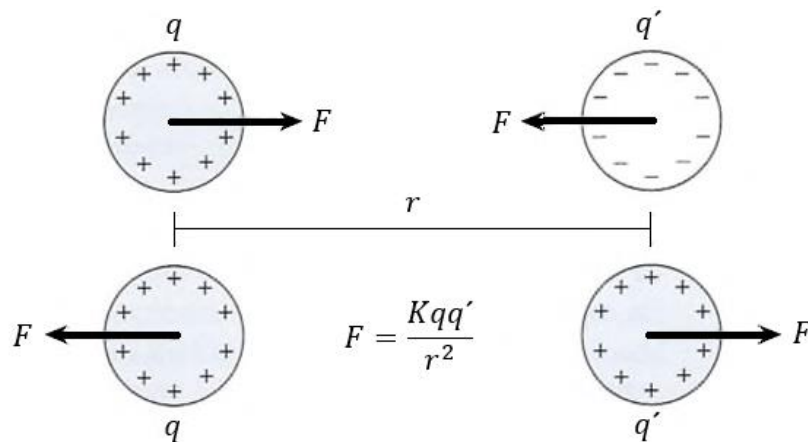


Figura 2 Ley de Coulomb.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

En dicha figura se indica la fuerza de atracción F entre dos cargas contrarias, así como a fuerza de repulsión entre dos cargas similares. En cualquier caso, la magnitud de la fuerza se determina mediante las magnitudes de las cargas q y q' y por su separación r . Partiendo de la ley de Coulomb, escribimos

$$F \propto \frac{qq'}{r^2}$$

o bien

$$F = \frac{kqq'}{r^2}$$

La constante de proporcionalidad k incluye las propiedades del medio que separa los cuerpos cargados y tiene las dimensiones que dicta la Ley de Coulomb.

En unidades del SI , el sistema práctico para el estudio de la electricidad, la unidad de carga se expresa en Coulombs (C). En este caso, la cantidad de carga no se define por medio de la Ley de Coulomb, sino que se relaciona con el flujo de una carga a través de un conductor. Posteriormente veremos que esta velocidad de flujo se mide en amperes. Una definición formal del Coulomb es la siguiente:

Un Coulomb es la carga transferida en un segundo a través de cualquier sección transversal de un conductor, mediante una corriente constante de un Ampere.

Comparemos el Coulomb con la carga de un electrón.

$$1 C = 6.25 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

Obviamente el Coulomb es una unidad extremadamente grande desde el punto de vista de la mayoría de los problemas en electrostática. La carga de un electrón expresada en Coulombs es

$$e^- = 1.602 \times 10^{-19} C$$

donde e^- es el símbolo para el electrón y el signo menos denota la naturaleza de la carga. Una unidad más conveniente para la electrostática es el microcoulomb (μC) definido por

$$1 \mu C = 10^{-6} C$$

Puesto que las unidades de fuerza, carga y distancia del *SI* no dependen de la Ley de Coulomb, la constante de proporcionalidad k debe determinarse experimentalmente. Un gran número de experimentos han mostrado que cuando la fuerza está en Newtons, la distancia en metros y la carga en Coulombs, la constante de proporcionalidad es, en forma aproximada,

$$k = 9 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$$

Cuando se aplica la Ley de Coulomb en unidades del *SI*, se debe sustituir este valor en la fórmula

$$F = \frac{(9 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2) qq'}{r^2}$$

Conviene recordar que F representa la fuerza sobre una partícula cargada y es, por tanto, una cantidad vectorial. La dirección de la fuerza se determina tan sólo por la naturaleza (+ ó -) de las cargas q y q' . Para dos cargas, cada una ejercerá la misma fuerza sobre la otra con la excepción de que las fuerzas estarán en direcciones opuestas (la atracción o repulsión es mutua). Por tanto, primero se debe decidir cuál carga considerar y luego determinar la dirección de la fuerza sobre esa carga debida a la otra carga. La dirección se determina por medio de las leyes de atracción y repulsión; cargas iguales se repelen y cargas distintas se atraen. La magnitud de la fuerza F se obtiene a partir de la Ley de Coulomb al sustituir los valores absolutos para q , q' y r . Las unidades de las cargas deben ser Coulombs y las de la distancia deben ser metros si las fuerzas se van a medir en Newtons. [1]

Ejemplo 1 Dos cargas, $q_1 = -8\mu C$ y $q_2 = +12\mu C$ se colocan a 12 cm de distancia entre sí en el aire. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una tercera carga, $q_3 = -4\mu C$, colocada a medio camino entre las otras dos fuerzas?

Plan: Primero dibujamos una línea recta horizontal e indicamos las posiciones y magnitudes de las tres cargas, como muestra la figura 3. Nos centramos en la carga central q_3 e indicamos las

direcciones de las fuerzas F_1 y F_2 que actúan sobre q_3 debido a las cargas q_1 y q_2 . La Ley de Coulomb nos permite obtener las magnitudes de las fuerzas, y su resultante puede calcularse como la suma de vectores.

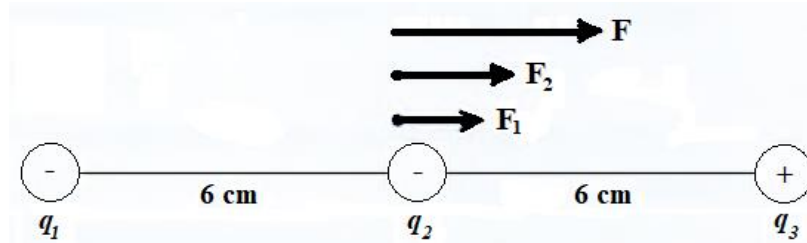


Figura 3 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga que está colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

Solución: Primero se convierte la distancia a metros ($12\text{ cm} = 0.12\text{ m}$) y se obtiene el punto medio, es decir, se saca la mitad de 0.12 m , que es igual a 0.06 m . Las cargas se convierten a Coulombs ($1\mu\text{C} = 1 \times 10^{-6}\text{ C}$). La fuerza F_1 sobre q_3 debida a q_1 se calcula a partir de la Ley de Coulomb. Recuerde que el signo de la carga se usa sólo para hallar la dirección de las fuerzas. Los valores absolutos sólo se necesitarán para sustitución

$$F_1 = \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(8 \times 10^{-6} \text{ C})(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.06 \text{ m})^2}$$

$$F_1 = 80 \text{ N} \quad \text{repulsión a la derecha}$$

De manera similar, la fuerza F_2 , en q_3 es igual a

$$F_2 = \frac{kq_2q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(12 \times 10^{-6} \text{ C})(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.06 \text{ m})^2}$$

$$F_2 = 120 \text{ N} \quad \text{atracción a la derecha}$$

Finalmente, la fuerza resultante es la suma de vectores de F_1 y F_2

$$F = 80 N + 120 N = 200 N, \text{ a la derecha.}$$

Observe que los signos de las cargas se usaron sólo para determinar la dirección de las fuerzas; no se usaron en la Ley de Coulomb. [1]

Ejemplo 2 Tres cargas, $q_1 = +4 \times 10^{-9} C$, $q_2 = -6 \times 10^{-9} C$ y $q_3 = -8 \times 10^{-9} C$, están separadas como muestra la figura 4. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Plan: Trazamos un esquema y un diagrama de cuerpo libre, marcando toda la información proporcionada, como se aprecia en la figura 4. Consideramos la carga q_3 para calcular de manera independiente la magnitud y la dirección de cada fuerza debida a las otras cargas. La fuerza resultante se determina mediante el método de las componentes.

Solución: Sea F_1 la fuerza sobre q_3 debida a q_1 y sea F_2 la fuerza sobre q_3 debida a q_2 . F_1 es la fuerza de atracción (cargas distintas) y F_2 es una fuerza de repulsión (cargas iguales), como muestra la figura 4. La magnitud y la dirección de cada fuerza se determinan como sigue:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2)(4 \times 10^{-9} C)(8 \times 10^{-9} C)}{(0.1 m)^2} \\ &= 2.88 \times 10^{-5} N = 28.8 \mu N \quad 143.13^\circ \end{aligned}$$

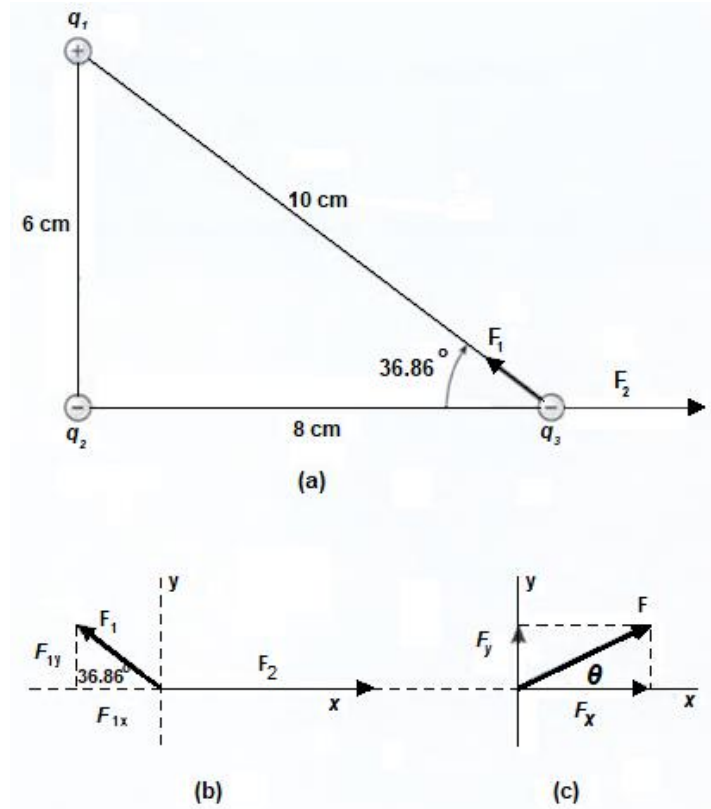


Figura 4 Representación de las cargas, ejemplo 2.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

$$F_2 = \frac{kq_2q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(6 \times 10^{-9} \text{ C})(8 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.08 \text{ m})^2}$$

$$= 6.75 \times 10^{-5} \text{ N} = 67.5 \mu\text{N}$$

La fuerza resultante se determina usando el método de componentes de la suma de vectores. Las componentes x y y de F_1 y F_2 , se resumen en la tabla 1. [1]

Vector	Ángulo θ_x	Componente x	Componente y
$F_1 = 28.8 \mu N$	143.13°	$F_{1x} = (28.8 \mu N)(\cos 143.13^\circ)$ $= -23 \mu N$	$F_{1y} = (28.8 \mu N)(\sin 143.13^\circ)$ $= 17.28 \mu N$
$F_2 = 67.5 \mu N$	0°	$F_{2x} = 67.5 \mu N$	$F_{2y} = 0 \mu N$
F	θ	$F_x = \Sigma F_x = 44.5 \mu N$	$F_y = \Sigma F_y = 17.3 \mu N$

Tabla 1 Descomposición de los vectores.*Fuente: Creación propia*

En la figura 4c, aplicamos el teorema de Pitágoras para determinar la magnitud de la fuerza resultante F sobre q_3 :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(44.5 \mu N)^2 + (17.3 \mu N)^2} = 47.7 \mu N$$

A continuación, se encuentra la dirección a partir de la función tangente.

$$\tan \theta = \text{abs} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) = \text{abs} \left(\frac{17.3 \mu N}{44.5 \mu N} \right) \text{ y } \theta = 21.2^\circ$$

Por consiguiente, la fuerza resultante sobre q_3 es $47.7 \mu N$ con un $\theta = 21.2^\circ$

1.6 Ley de Gauss y sus aplicaciones

Para cualquier distribución de carga podemos dibujar un número infinito de líneas eléctricas. Es claro que, si la separación entre las líneas será una indicación estándar de la intensidad del campo, debemos establecer un límite al número de líneas trazadas para cada situación. Por ejemplo, consideremos las líneas del campo dirigidas radialmente hacia fuera a partir de una carga puntual positiva (ver la figura 5). Usaremos la letra N para representar el número de líneas

trazadas. Ahora imaginemos que una superficie esférica rodea la carga puntual a una distancia r de la carga. La intensidad del campo en cualquier punto de una esfera así estaría dada por



Figura 5 La intensidad del campo eléctrico a una distancia r de las cargas puntuales es directamente proporcional al número de líneas ΔN que penetran por unidad ΔA de una superficie esférica construida en esa distancia.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Partiendo de la forma en que se trazan las líneas del campo también podemos decir que el campo en una pequeña porción de su área ΔA es proporcional al número de líneas ΔN que penetran en esa área. En otras palabras, la densidad de líneas del campo (líneas por unidad de área) es directamente proporcional a la intensidad del campo. Simbólicamente,

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} \propto E_n$$

El subíndice n indica que el campo es normal al área superficial en todas partes. Esta proporcionalidad siempre es válida, independientemente del número total de líneas N que se pueden trazar. Sin embargo, una vez que se elige una constante de proporcionalidad, se establece automáticamente un límite para el número de líneas que pueden trazarse en cada situación. Se ha encontrado que la elección más conveniente para esta constante de espaciamiento es ϵ_0 . Esto se conoce como *permitividad del espacio libre* y se define mediante la expresión

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

Donde $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ de la Ley de Coulomb. Entonces, la ecuación finamente puede escribirse como

$$N = \epsilon_0 E_n A = \frac{\epsilon_0}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r^2} (4\pi R^2) = q$$

La elección de ϵ_0 como la constante de proporcionalidad ha dado por resultado que el número total, de líneas que pasan normalmente a través de una superficie es numéricamente igual a la carga contenida dentro de la superficie. Aunque este resultado se obtuvo usando una superficie esférica, se aplicará a cualquier otra superficie. El planteamiento más general de ese resultado se conoce como **Ley de Gauss**:

El número total de líneas de fuerza eléctricas que cruzan cualquier superficie cerrada en dirección hacia fuera es numéricamente igual a la carga neta total contenida dentro de esa superficie.

$$N = \Sigma \epsilon_0 E_n A = \Sigma q \quad \text{Ley de Gauss}$$

La Ley de Gauss se utiliza para calcular la intensidad del campo cerca de las superficies de carga. Esto representa una clara ventaja sobre los métodos desarrollados anteriormente debido a que las ecuaciones anteriores se aplican sólo a cargas puntuales. La mejor forma de entender la aplicación de la ley de Gauss es mediante ejemplos.

APLICACIONES

Puesto que la mayor parte de los conductores cargados tienen grandes cantidades de carga sobre ellos, no resulta práctico considerar las cargas en forma individual. Generalmente se habla de la *densidad de carga* σ , definida como la carga por unidad de área superficial.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \quad q = \sigma A \quad \text{Densidad de carga}$$

Ejemplo

Calcule cuál es la intensidad del campo eléctrico a una distancia r de una placa infinita de carga positiva, como se representa en la figura 6.

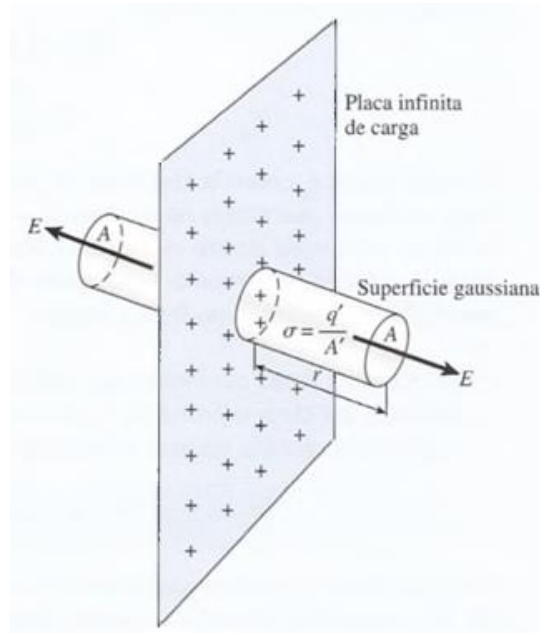


Figura 6 Cálculo del campo fuera de una placa infinita de carga positiva.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Plan: El propósito de aplicar la Ley de Gauss es hallar una expresión que relacione el campo eléctrico con la *densidad de carga* σ . La aplicación de la ley de Gauss suele precisar la elaboración de una superficie geométrica imaginaria que recibe el nombre de superficie gaussiana. La idea es encerrar una carga neta dentro de una superficie cuya geometría es de una simpleza tal que es posible determinar su área sin ningún problema. La elección de una superficie imaginaria está dictada por la forma del cuerpo cargado. En este ejemplo, una elección inteligente es una superficie cilíndrica que penetre en la placa de carga positiva de forma que se proyecte a una distancia r en cualquier lado de la placa. La carga total Σq encerrada por esta superficie debe equivaler a $\Sigma \epsilon_0 A$ de acuerdo con la ley de Gauss, y usaremos este hecho para determinar una expresión para la intensidad el campo eléctrico a la distancia igual a r .

Solución: Puesto que el diámetro del cilindro es arbitrario, nos será práctico trabajar con la *densidad de carga* σ . El área A de cada extremo del cilindro es la misma que el área recortada sobre la placa de carga; por tanto, la carga total contenida dentro del cilindro está dada por

$$\Sigma q = \sigma A$$

Debido a la simetría de la placa de carga, la intensidad del campo resultante E debe tener una dirección perpendicular a la placa en cualquier punto cercano a ella. Sólo hay que considerar las líneas de intensidad que pasan perpendiculares a las dos superficies de área A . Con base en la Ley de Gauss podemos escribir

$$\begin{aligned}\Sigma \epsilon_0 EA &= \Sigma q \\ \epsilon_0 EA + \epsilon_0 EA &= \sigma A \\ 2 \epsilon_0 EA &= \sigma A \\ E &= \frac{\sigma}{2 \epsilon_0}\end{aligned}$$

Observe que la intensidad del campo E se aleja de la placa en ambos lados y es independiente de la distancia r a la placa. Antes de suponer que el ejemplo de una placa de carga infinita es poco práctico, debe señalarse que el término infinito, en un sentido práctico, implica únicamente que las dimensiones de la placa exceden el punto de interacción eléctrica. [1]

1.7 Definición de Potencial Eléctrico

El estudio del concepto de campo eléctrico como fuerza por unidad de carga, indica que la principal ventaja de un concepto de ese tipo es que permite asignar una propiedad eléctrica al espacio. Si se conoce la intensidad del campo en cierto punto, es posible predecir la fuerza sobre una carga situada en ese punto. De igual forma es conveniente asignar otra propiedad al espacio que rodea una carga, y que nos permite predecir la energía potencial debida a otra carga situada en cualquier punto. Esta propiedad del espacio se llama *potencial* y se define como sigue:

El potencial V en un punto situado a una distancia r de una carga Q es igual al trabajo por unidad de carga realizado contra las fuerzas eléctricas para transportar una carga positiva $+q$ desde el infinito hasta dicho punto.

En otras palabras, el potencial en determinado punto A , como muestra la figura 7, es igual a la energía potencial por unidad de carga. Las unidades de potencial se expresan en Joules por Coulomb y se conocen como Volt (V)

$$V_A(V) = \frac{EP(J)}{q(C)}$$

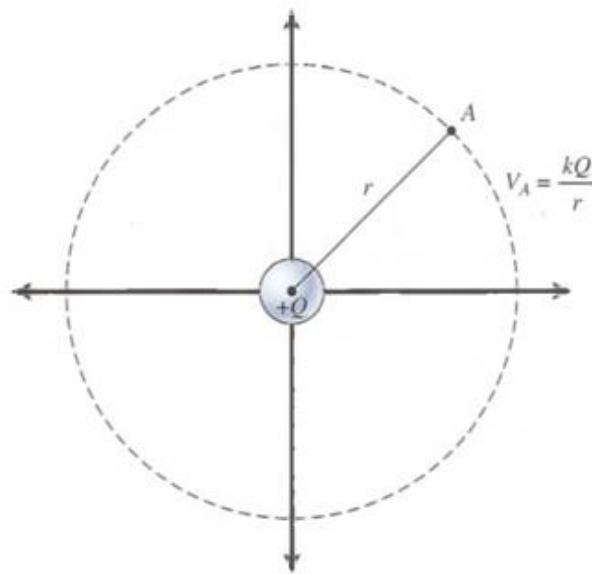


Figura 7 Cálculo del potencial a una distancia r de una carga $+Q$.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Esto significa que un potencial de 1 *volt* en el punto A significa que, si una carga de un Coulomb se colocara en A , la energía potencial sería de un Joule. En general, cuando se conoce el potencial en el punto A , la energía potencial debida a la carga q en ese punto se puede determinar a partir de

$$EP = qV_A$$

Sustituyendo nos queda una expresión para calcular directamente el potencial eléctrico:

$$V_A = \frac{EP}{q} = \frac{kQq/r}{q}$$

$$V_A = \frac{kQ}{r} \quad \text{Energía Potencial Eléctrica}$$

El símbolo V_A se refiere al potencial eléctrico en el punto A localizado a una distancia r de la carga Q .

A estas alturas podemos observar que el potencial es el mismo en todos los puntos ubicados a iguales distancias de una carga esférica. Por este motivo, las líneas punteadas que aparecen en la figura 7 se conocen como líneas equipotenciales. Observe que las líneas de igual potencial son siempre perpendiculares a las líneas del campo eléctrico. Si esto no fuera cierto, el trabajo se realizaría mediante una fuerza resultante cuando una carga se desplazara a lo largo de una línea equipotencial. Un trabajo así aumentaría o disminuiría el potencial.

Las líneas equipotenciales siempre son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico.

Antes de proponer un ejemplo, es preciso señalar que el potencial eléctrico en un punto dado se define en términos de una carga positiva. Esto significa que el potencial eléctrico será negativo en un punto localizado en el espacio que rodea a una carga negativa. Debemos recordar la siguiente regla:

El potencial debido a una carga positiva es positivo y el Potencial debido a una carga negativa es negativo.

El uso del signo negativo para una carga negativa Q en la ecuación, resulta en un valor negativo para el potencial

1.8 Cálculo de Potencial Eléctrico

Ejemplo 1

- (a) Calcule el potencial eléctrico en el punto A que está a 30 cm de distancia de una carga de $-2\mu\text{C}$
- (b) ¿Cuál es la energía potencial si una carga de $+4\text{nC}$ está colocada en A .

Plan: Al principio no hay energía potencial EP debido a que sólo hay una carga. Sin embargo, hay potencial eléctrico V en el espacio que rodea a la carga. En (a) usaremos la ecuación de la Energía Potencial Eléctrica para calcular el potencial eléctrico a una distancia de 0.30 m de la carga de $-2\mu\text{C}$. Luego usaremos la ecuación $EP = qV_A$ para determinar la energía potencial cuando la carga de $+4\text{nC}$ se coloca en A .

Solución (a)

$$V_A = \frac{kQ}{r} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(-2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.3 \text{ m})} = -6 \times 10^4 \text{ V}$$

Solución (b)

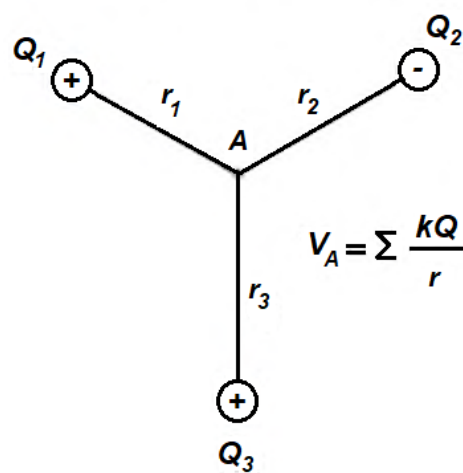
$$EP = qV_A = (4 \times 10^{-9} \text{ C})(-6 \times 10^4 \text{ V}) = -2.4 \times 10^{-4} \text{ J}$$

Un valor negativo para la energía potencial significa que, al separar las cargas, el trabajo se debe realizar en contra del campo eléctrico. En este ejemplo, una fuerza externa debe suministrar un trabajo de $2.4 \times 10^{-4} \text{ J}$ para poder transportar la carga hasta el infinito.

Ahora consideremos el caso más general, ilustrado en la figura 8, que se ocupa del potencial en los alrededores de cierto número de cargas:

El potencial eléctrico en la vecindad de cierto número de cargas es igual a la suma algebraica de los potenciales eléctricos que corresponden a cada carga.

$$V_A = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} + \frac{kQ_3}{r_3}$$


The diagram illustrates a central point A with three lines extending to point charges. The top-left charge is labeled Q1 with a '+' sign, and the distance from A to Q1 is r1. The top-right charge is labeled Q2 with a '-' sign, and the distance from A to Q2 is r2. The bottom charge is labeled Q3 with a '+' sign, and the distance from A to Q3 is r3. To the right of the diagram, the equation $V_A = \sum \frac{kQ}{r}$ is written.

Figura 8 Potencial eléctrico en la vecindad de cierto número de cargas.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

$$V_A = V_1 + V_2 + V_3 + \dots = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} + \frac{kQ_3}{r_3} + \dots$$

Recuerde que el potencial eléctrico en la vecindad de una carga positiva es positivo y el potencial eléctrico en la vecindad de una carga negativa es negativo. Esto significa que el signo de la carga se toma en cuenta en los cálculos. En general, el potencial eléctrico en un punto en el espacio cercano a otras cargas está dado por

$$V_A = \sum \frac{kQ}{r}$$

Esta ecuación es una suma algebraica puesto que el potencial eléctrico es una cantidad escalar y no una cantidad vectorial, como ocurre con las fuerzas y los campos eléctricos.

Ejemplo 2

Dos cargas, $Q_1 = +6\mu\text{C}$ y $Q_2 = -6\mu\text{C}$, están separadas 12 cm , como muestra la figura 9. Calcule el potencial en los puntos A y B .

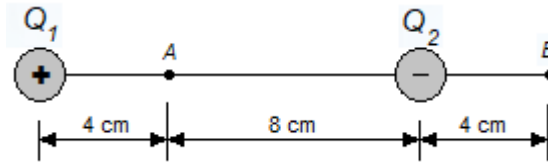


Figura 9 Representación ejemplo 2.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Plan: El potencial eléctrico en un punto en particular es la suma algebraica de los potenciales eléctricos debidos a cada carga, con las distancias medidas de cada carga a dicho punto. Los signos de la carga pueden usarse en el proceso de suma para calcular el potencial total

Solución (a): El potencial eléctrico en A se encuentra a partir de la ecuación

$$V_A = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (6 \times 10^{-6} \text{ C})}{4 \times 10^{-2} \text{ m}} + \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (-6 \times 10^{-6} \text{ C})}{8 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$13.5 \times 10^5 \text{ V} - 6.75 \times 10^5 \text{ V} = 6.75 \times 10^5 \text{ V}$$

Esto significa que el campo eléctrico realizará un trabajo de $6.75 \times 10^5 \text{ J}$ por cada Coulomb de carga positiva que transporta de A al infinito.

Solución (b): El potencial eléctrico en B es

$$V_B = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{16 \times 10^{-2} \text{ m}} + \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(-6 \times 10^{-6} \text{ C})}{4 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$3.38 \times 10^5 \text{ V} - 13.5 \times 10^5 \text{ V} = -10.125 \times 10^5 \text{ V}$$

Los valores negativos indican que el campo se mantendrá sobre una carga positiva. Para mover 1 C de carga positiva desde A hasta el infinito, otra fuente de energía debe desarrollar un trabajo de $10.125 \times 10^5 \text{ V}$. El campo desarrollará un trabajo negativo, igual a esta cantidad. [1]

1.9 Diferencia de Potencial

En la electricidad práctica, es de escaso interés el trabajo por unidad de carga para trasladar una carga al infinito. Con más frecuencia deseamos conocer los requisitos de trabajo para mover cargas entre dos puntos. Lo anterior conduce el concepto de **diferencia de potencial**.

La diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga positiva que realizan fuerzas eléctricas para mover una pequeña carga de prueba desde el punto de mayor potencial al punto de menor potencial.

Otra forma de expresar el mismo concepto sería afirmar que la diferencia de potencial entre dos puntos es la diferencia en los potenciales en esos puntos. Por ejemplo, si el potencial en cierto punto A es de 100 V y el potencial en otro punto B es de 40 V , la diferencia de potencial es

$$V_A - V_B = 100 \text{ V} - 40 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

Esto quiere decir que los $60 J$ de trabajo serán realizados por el campo sobre cada Coulomb de carga positiva que se desplaza desde A hasta B . En general, el trabajo realizado por un *campo eléctrico*, o *trabajo eléctrico*, para mover una carga q del punto A al punto B se puede determinar a partir de

$$\text{Trabajo}_{A \rightarrow B} = Q(V_A - V_B)$$

Ejemplo.

¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y B en la figura 9? Considere el ejemplo anterior. ¿Cuánto trabajo realiza un campo eléctrico al mover una carga de $-2\eta C$ del punto A al punto B ?

Plan: La diferencia de potencial es simplemente $V_A - V_B$; el trabajo para mover la carga de A a B es el producto de q por la diferencia de potencial.

Solución: Los potenciales en los puntos A y B se calcularon en el ejemplo anterior. Éstos son

$$V_A = 6.75 \times 10^5 V \quad \text{y} \quad V_B = -10.125 \times 10^5 V$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre los puntos A y B es

$$V_A - V_B = 6.75 \times 10^5 V - (-10.125 \times 10^5 V) = 16.845 \times 10^5 V$$

Puesto que A está a un potencial mayor que B , el campo realizaría un trabajo positivo cuando una carga positiva se moviera desde A hasta B . Si se desplazara una carga negativa, el trabajo realizado por el campo para moverla desde A hasta B sería negativo. En este ejemplo, el trabajo es

$$\begin{aligned} \text{Trabajo}_{A \rightarrow B} &= q(V_A - V_B) \\ &= (-2 \times 10^{-9} C)(16.845 \times 10^5 V) = -3.37 \times 10^{-3} J \end{aligned}$$

Por el hecho de que el trabajo realizado por este campo es negativo, otra fuente de energía debe suministrar el trabajo para mover la carga.

1.10 Aplicaciones

La electrostática es una rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos estáticos y su comportamiento en presencia de cargas eléctricas. Aunque puede parecer algo abstracto, la electrostática tiene muchas aplicaciones prácticas que se utilizan en la vida cotidiana.

Una de las aplicaciones más importantes de la electrostática es en la generación de energía eléctrica. La mayoría de las centrales eléctricas utilizan la fuerza electrostática para producir energía a partir de la interacción entre cargas eléctricas. La energía potencial electrostática se convierte en energía eléctrica utilizable mediante el uso de generadores eléctricos.

Otra aplicación importante de la electrostática es en la producción de imágenes. Las impresoras láser utilizan la electrostática para imprimir imágenes y texto en papel. La carga electrostática se aplica a un tambor fotosensible y luego se utiliza un láser para eliminar la carga de las áreas donde se desea imprimir la imagen o el texto. El tóner se adhiere a las áreas cargadas y luego se fija al papel para producir la imagen final.

La electrostática también se utiliza en la purificación del aire. Los filtros electrostáticos son dispositivos que utilizan la carga electrostática para capturar partículas y contaminantes del aire. Las partículas cargadas son atraídas por placas cargadas en el filtro y se eliminan del aire. Esta tecnología se utiliza comúnmente en sistemas de aire acondicionado y en la filtración de aire en salas limpias.

Además, la electrostática también tiene aplicaciones en la medicina. Los marcapasos cardíacos utilizan la estimulación eléctrica para regular el ritmo cardíaco. Los instrumentos médicos también pueden utilizar la electrostática para medir la actividad eléctrica del cerebro y los músculos. [11]

La Ley de Coulomb es fundamental en nuestra vida diaria, ya que explica la interacción entre cargas eléctricas. A continuación, te presento algunos ejemplos prácticos de cómo esta ley impacta nuestro día a día:

- *Electrodomésticos*: Los electrodomésticos funcionan gracias a la interacción de cargas eléctricas, como en el caso de los refrigeradores o televisores.
- *Tecnología*: Desde tu teléfono celular hasta tu computadora, la Ley de Coulomb es la base de su funcionamiento.
- *Transporte*: Los sistemas de carga eléctrica en vehículos como los coches eléctricos dependen de esta ley para su operación.

En resumen, la Ley de Coulomb es esencial en diversos aspectos de nuestra vida cotidiana, desde la tecnología hasta los electrodomésticos y el transporte. Su comprensión nos permite entender mejor el mundo que nos rodea y aprovechar al máximo la electricidad en nuestras actividades diarias. [12]

El potencial eléctrico es fundamental en la física para entender cómo las cargas eléctricas interactúan y se mueven en campos eléctricos. Este concepto no solo es teórico, sino que tiene aplicaciones prácticas en la tecnología cotidiana, como en el diseño de baterías y generadores. La energía potencial eléctrica y la diferencia de potencial son claves para el funcionamiento de dispositivos electrónicos y su capacidad para realizar trabajo. [13]

Los **Conductores Eléctricos** se usan en las siguientes aplicaciones:

Cableado eléctrico, Electrónica, Transmisión de energía, Industria automotriz, Iluminación, Equipos médicos, Industria aeroespacial, Energía renovable, entre otras.

Los **materiales aislantes** son útiles en la industria eléctrica para:

Recubrir el cableado, conducir la carga hacia su destino deseado. Los aislantes impiden la dispersión de la carga eléctrica a lo largo del tránsito. Por ejemplo, en las torres y soportes eléctricos. Elaborar materiales de protección para usuarios y operadores de la industria eléctrica. Estos materiales permiten aislar los cuerpos de los usuarios del posible contacto con la corriente. [14]

UNIDAD 2 Capacitancia

Competencias

Específica:

- Conoce el concepto de capacitancia y sus aplicaciones en circuitos eléctricos mixtos
- Conoce la construcción de un capacitor y sus propiedades.
- Resuelve problemas de capacitancia

Genéricas:

- Capacidad de organizar y planificar
- Trabajo en equipo
- Capacidad de aplicar conocimientos en la práctica

2.1 Definición de Capacitancia

Consideremos dos conductores que tienen una diferencia de potencial V entre ellos y supongamos que los 2 conductores tienen cargas iguales y de signo opuesto, como en la figura 10. Esto se puede lograr conectando los dos conductores a las terminales de una batería. Una combinación de conductores así cargados es un dispositivo conocido como capacitor. Se encuentra que la diferencia de potencial V a la carga Q en el condensador.

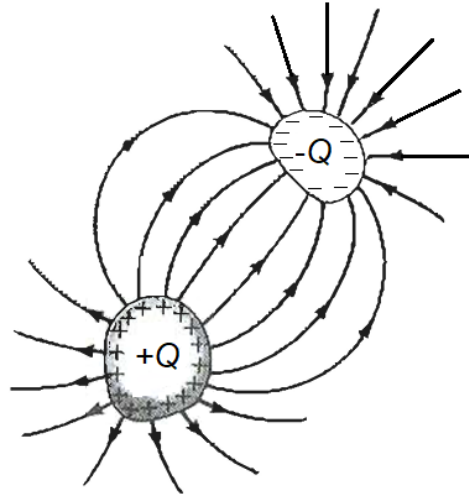


Figura 10 Un condensador consta de conductores, aislados, con la misma carga, pero opuesta.
 Fuente: Serway. (2000). *Electricidad y magnetismo - 4 edición*. McGraw-Hill Interamericana.

La capacitancia C de un conductor se define como la razón de la magnitud de la carga en cualquiera de los dos conductores a la diferencia de potencial entre ellos.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Obsérvese que por definición la Capacitancia siempre es una cantidad positiva. Además, como la diferencia de potencial aumenta al aumentar la carga almacenada en el capacitor, la razón Q/V es una constante para un capacitor dado. Por lo tanto, la capacitancia de un dispositivo es la medida de su capacidad de almacenar carga y energía potencial eléctrica.

De la expresión $C = Q/V$, se ve que las unidades de la capacitancia en el *SI* son el Coulomb por Volt. La unidad en el *SI* para la capacitancia es el Faradio (F), en honor a Michael Faraday. Es decir,

$$\text{Capacitancia} = 1F = 1 \text{ C/V}$$

El Faradio es una unidad muy grande de capacitancia, en la práctica, los dispositivos típicos tienen capacitancias que van desde *microfarad* ($1\mu F = 1 \times 10^{-6} F$) hasta *picofarad* ($1pF = 1 \times 10^{-12} F$). Como una nota práctica, los condensadores tienen etiquetas que marcan μF para *microfarad* y pF para *picoFarad*.

La Capacitancia depende del arreglo geométrico de los conductores. Para mostrar este punto se determinará la capacitancia de un conductor esférico aislado de radio R y carga Q . (El segundo conductor se puede considerar como un cascarón esférico hueco concéntrico de radio infinito). Ya que el potencial de la esfera es simplemente KQ/R (donde $V = 0$ en el infinito) su capacitancia está dada por

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{kQ/R} = \frac{R}{k} = 4\pi \epsilon_0 R$$

Esto demuestra que la capacitancia de una esfera cargada aislada es proporcional a su radio y que es independiente tanto de la carga como de la diferencia de potencial. Por ejemplo, una esfera metálica aislada de radio 0.15 tiene una capacitancia de [3]

$$C = 4\pi \epsilon_0 R = 4\pi(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(0.15\text{m}) = 16.68 \text{ pF}$$

Ejemplo

Las placas paralelas de un capacitor con vacío están separadas una distancia de 5 mm y tienen 2 m^2 de área. Se aplica una diferencia de potencial de 10,000 V (10.0 kV) a través del capacitor. Calcule a) la capacitancia

Se tienen los datos del área de las placas A , y la separación d entre ellas. La variable que se busca es la capacitancia C .

Solución:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(2\text{m}^2)}{5 \times 10^{-3}\text{m}}$$

$$C = 3.54 \times 10^{-9} \text{ F} = 0.00354 \text{ } \mu\text{F}$$

2.2 Capacitor de placas paralelas

Dos placas paralelas de igual área A están separadas una distancia d como en la figura 11. Una placa tiene carga $+Q$ y la otra $-Q$. la carga por unidad de área en cada placa es $\sigma = Q/A$. si las placas están muy cercanas una de la otra (comparada con su longitud y su ancho), podemos despreciar los efectos de los extremos y suponer que el campo eléctrico es uniforme entre las placas y cero en cualquier otro lugar. El campo eléctrico entre las placas está dado por

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

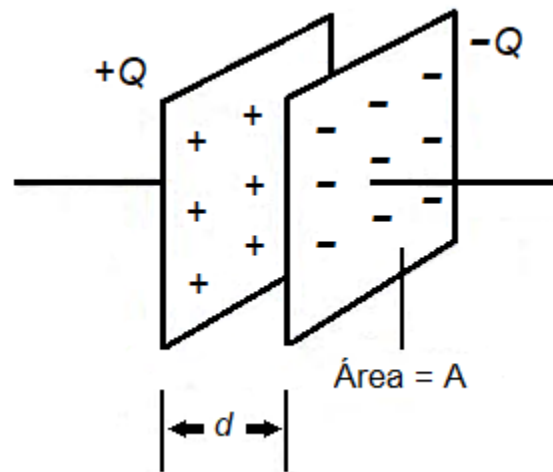


Figura 11 Capacitor de placas paralelas.

Fuente: Serway. (2000). *Electricidad y magnetismo - 4 edición*. McGraw-Hill Interamericana.

La diferencia de potencial entre las placas es igual a Ed , por lo tanto

$$V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

Sustituyendo este resultado, encontramos que la capacitancia está dada por

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Qd/\epsilon_0 A}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Esto significa que la capacitancia de un capacitor de placas paralelas es proporcional al área de éstas e inversamente proporcional a la separación entre ellas.

Como se ve de la definición de capacitancia, $C = Q/V$, la cantidad de carga almacenada en un capacitor, para una diferencia de potencial dada entre sus placas, aumenta al aumentar la capacitancia. Por lo tanto, se ve razonable que si se construye un capacitor con placas grandes debería almacenar grandes cargas. La cantidad de carga necesaria para producir una diferencia de potencial dada aumenta cuando decrece la separación entre las placas. [3]

Ejemplo

Un capacitor de placas paralelas tiene un área de $2 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una separación entre placas $d = 1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Encuentre su capacitancia.

Solución

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{2 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$= 1.77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1.77 \text{ pF}$$

2.3 Capacitor cilíndrico

Considere los dos conductores cilíndrico coaxiales de longitud infinita mostrados en la figura 12.

Encuentre la capacitancia por unidad de longitud.

Sabemos que el campo eléctrico es

$$E = \frac{\tau}{\epsilon_0} \frac{a}{r} a_r \quad a \leq r \leq b$$

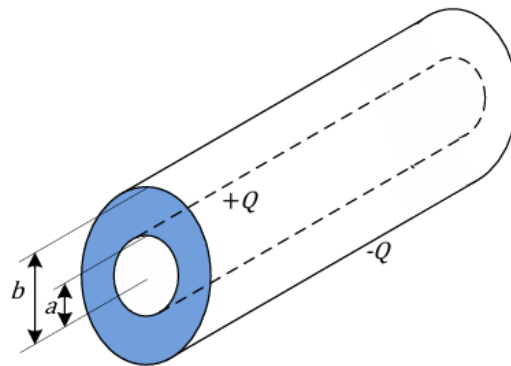


Figura 12 Capacitor cilíndrico o coaxial

Fuente: (N.d.). Unam.Mx. Retrieved June 25, 2024, from https://dctrl.fi-b.unam.mx/academias/aca_ace/txt/02_Capacitancia_diel.pdf

Por lo que la diferencia de potencial resulta ser

$$V_{ab} = - \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{\tau}{\epsilon_0} a \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad [V]$$

en función de la carga eléctrica en el conductor interior en una longitud l

$$V_{ab} = \frac{Q}{2\pi a l \epsilon_0} a \ln \left(\frac{b}{a} \right) = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 l} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad [V]$$

y la capacitancia es entonces

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [F]$$

Ejemplo

Supongamos que tenemos un capacitor cilíndrico con un dieléctrico que tiene una permitividad de $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$. Los radios de los cilindros interno y externo son 0.01 m y 0.02 m , respectivamente y la longitud de los cilindros es de 2 m . Usando la fórmula mencionada anteriormente, la capacitancia se calcularía de la siguiente manera:

$$C = \frac{2\pi(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)(2\text{m})}{\ln\left(\frac{0.02\text{m}}{0.01\text{m}}\right)}$$

$$C = \frac{1.112 \times 10^{-10}}{\ln(2)} = 1.604 \text{ F}$$

2.4 Dieléctricos

La mayoría de los capacitores tienen un material no conductor o dieléctrico entre sus placas conductoras. Un tipo común de capacitor emplea tiras largas de hojas (láminas) metálicas como placas, separadas por tiras de hojas de materiales plásticos, como Mylar. Estos materiales dispuestos en forma de emparedado se enrollan para formar una unidad capaz de proveer una capacitancia de varios microfarads en un paquete compacto (figura 13).

La colocación de un dieléctrico sólido entre las placas de un capacitor tiene tres funciones. La primera es que resuelve el problema mecánico de mantener dos hojas metálicas grandes con una separación muy pequeña sin que hagan contacto.

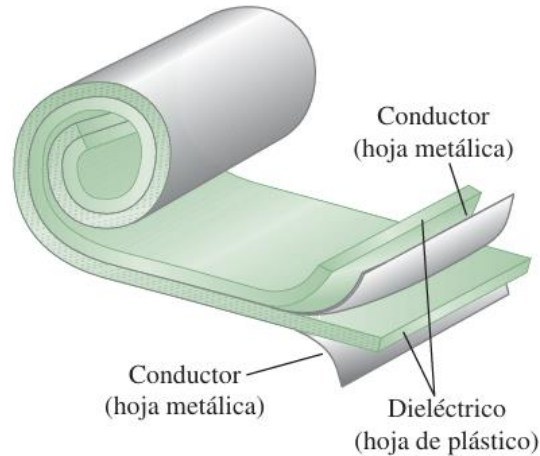


Figura 13 Un tipo común de capacitor utiliza láminas dieléctricas para separar los conductores.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La segunda función es que un dieléctrico incrementa al máximo posible la diferencia de potencial entre las placas del capacitor. Cualquier material aislante experimenta una ionización parcial que permite la conducción a través de él, si se somete a un campo eléctrico suficientemente grande. Este fenómeno se llama ruptura del dieléctrico. Muchos materiales dieléctricos toleran sin romperse campos eléctricos más intensos que los que soporta el aire. Así que el uso de un dieléctrico permite que un capacitor mantenga una gran diferencia de potencial V y que, por lo tanto, almacene cantidades más grandes de carga y energía.

La tercera función es que la capacitancia de un capacitor de dimensiones dadas es mayor cuando entre sus placas hay un material dieléctrico en vez de vacío. Este efecto se demuestra con ayuda de un electrómetro sensible, dispositivo que mide la diferencia de potencial entre dos conductores sin permitir un flujo apreciable de carga de uno a otro. La figura 14a ilustra un electrómetro conectado a través de un capacitor con carga, con magnitud de carga Q en cada placa y diferencia de potencial V_0 . Cuando entre las placas se inserta una lámina sin carga de material dieléctrico, como vidrio, parafina o poliestireno, los experimentos muestran que la diferencia de potencial disminuye a un valor pequeño V (figura 14b). Al retirar el dieléctrico, la diferencia de potencial vuelve a su valor original V_0 , lo que demuestra que las cargas originales en las placas no han cambiado.

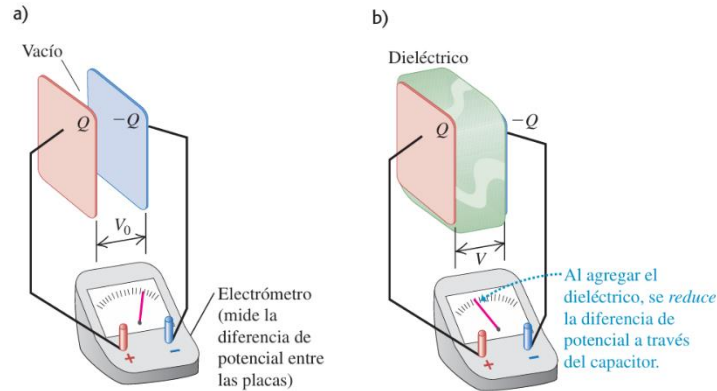


Figura 14 Efecto de un dieléctrico entre las placas paralelas de un capacitor. a) Con una carga dada, la diferencia de potencial es V_0 . b) Con la misma carga, pero con un dieléctrico entre las placas, la diferencia de potencial V es menor que V_0 .

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La capacitancia original C_0 está dada por $C_0 = \frac{Q}{V_0}$ y la capacitancia C con el dieléctrico presente es $C = \frac{Q}{V}$. La carga Q es la misma en ambos casos y V es menor que V_0 , de donde se concluye que la capacitancia C con el dieléctrico presente es mayor que C_0 . Cuando el espacio entre las placas está lleno por completo por el dieléctrico, la razón de C a C_0 (igual a la razón de V_0 a V) se denomina constante dieléctrica del material, K :

$$K = \frac{C}{C_0} \quad (\text{definición de constante dieléctrica})$$

Cuando la carga es constante, $Q = C_0 V_0 = CV$ y $C/C_0 = V_0/V$. En este caso, la ecuación se puede expresar de la forma

$$V = \frac{V_0}{K} \quad (\text{donde } Q \text{ es una constante})$$

Con el dieléctrico presente, la diferencia de potencial para una carga Q dada se reduce en un factor de K .

La constante dieléctrica K es un número puro. Como C siempre es mayor que C_0 , K siempre es mayor que la unidad. En la tabla 2 se incluyen algunos valores representativos de K . Para el vacío, $K = 1$, por definición. Para el aire a temperaturas y presiones ordinarias, K es alrededor de 1.0006; este valor es tan cercano a 1 que, para fines prácticos, un capacitor con aire es equivalente a uno con vacío. Observe que, aunque el agua tiene un valor de K muy grande, por

lo general no es un dieléctrico muy práctico como para usarlo en capacitores. La razón es que, si bien el agua pura es un conductor deficiente, por otro lado, es un excelente solvente iónico. Cualquier ion disuelto en el agua haría que las cargas fluyeran entre las placas del capacitor, por lo que éste se descargaría

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

Tabla 2 Valores de la constante dieléctrica, K a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Ningún dieléctrico real es un aislante perfecto. Por consiguiente, siempre hay cierta corriente de fuga entre las placas con carga de un capacitor con dieléctrico. [2]

2.5 Capacitores en serie y paralelo

A menudo los circuitos eléctricos están formados por dos o más capacitores conectados en grupo. Para conocer el efecto de esta agrupación es conveniente recurrir al diagrama del circuito, en el que los dispositivos eléctricos se representan mediante símbolos. En la figura 15 se ilustran cuatro de los símbolos más comunes relacionados con los condensadores. El extremo de mayor potencial de una batería se indica mediante una línea más larga. El extremo de mayor potencial de un condensador se representa con una línea recta, en tanto que con una línea curva se denota el lado de menor potencial. Una flecha indica un condensador variable.

Una conexión a tierra es una conexión eléctrica entre los alambres de un aparato y su chasis metálico o cualquier otro depósito grande de cargas positivas y negativas.

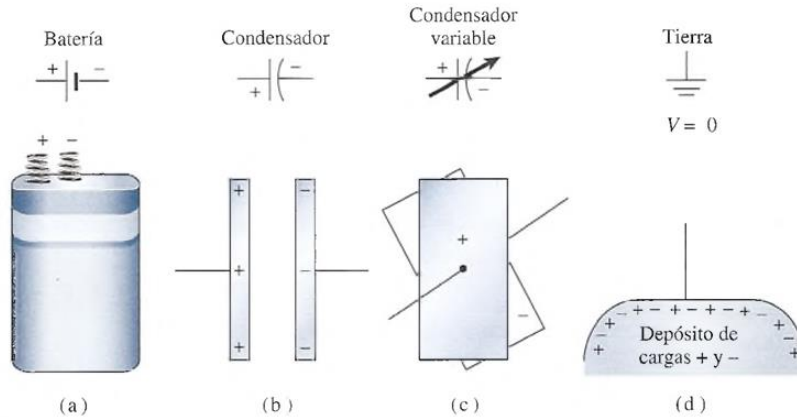


Figura 15 Definición de los símbolos más usados al trabajar con capacitores.
 Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

En primer lugar, consideremos el efecto de un grupo de capacitores conectados a lo largo de una sola trayectoria, como se muestra en la figura 16. Ese tipo de conexión, en la que la placa positiva de un condensador está conectada a la placa negativa de otro, recibe el nombre de conexión en serie. La batería mantiene la diferencia de potencial V entre la placa

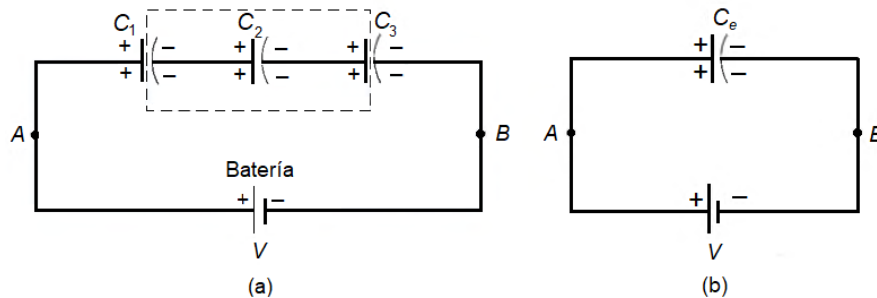


Figura 16 Cálculo de la capacitancia equivalente de un grupo de capacitores conectados en serie.
 Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

positiva de C_1 y la negativa de C_3 , transfiriendo electrones de una a la otra. La carga no puede pasar entre las placas de un condensador; por tanto, toda la carga que se halla dentro del paralelogramo punteado en la figura 16a es carga inducida; debido a ello, la carga en cada condensador es idéntica. Escribimos

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

donde Q es la carga efectiva transferida por medio de la batería.

Los tres capacitores pueden reemplazarse por una capacitancia equivalente C sin que cambie el efecto externo. Ahora conviene deducir una expresión para calcular esta capacitancia equivalente en el caso de conexiones en serie. Puesto que la diferencia de potencial entre A y B es independiente de la trayectoria, el voltaje de la batería debe ser igual a la suma de las caídas de potencial a través de cada capacitor

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

La capacitancia C se define por la razón Q/V , por lo tanto, queda

$$\frac{Q}{C_e} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3}$$

Para una conexión en serie, $Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$ así que podemos dividir entre la carga, como sigue

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_3} \quad \text{conexión serie}$$

La capacitancia efectiva total para dos capacitores en serie es

$$C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Se deja como ejercicio la deducción de la ecuación anterior.

Ahora consideremos un grupo de capacitores conectados de tal modo que la carga pueda compartirse entre dos o más conductores. Cuando varios condensadores se conectan directamente a la misma fuente de potencial, como en la figura 17, se dice que están conectados en paralelo. Con base en la definición de capacitancia, la carga en cada condensador paralelo es

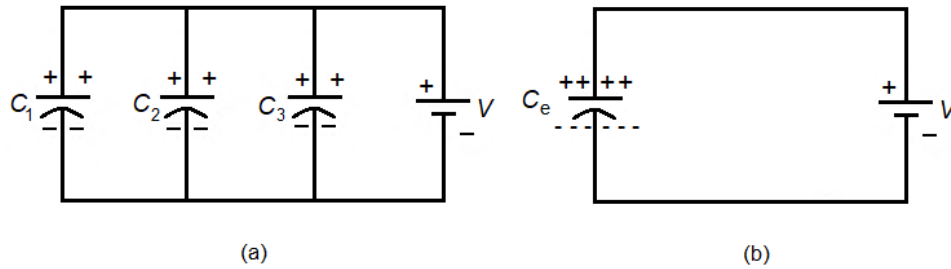


Figura 17 Capacitancia equivalente de un conjunto de condensadores conectados en paralelo.
Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

$$Q_1 = C_1 V_1 \quad Q_2 = C_2 V_2 \quad Q_3 = C_3 V_3$$

La carga total Q es igual a la suma de las cargas individuales.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

La capacitancia equivalente del circuito completo es $Q = CV$, de modo que la ecuación se transforma en

$$CV = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3$$

Para una conexión en paralelo,

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

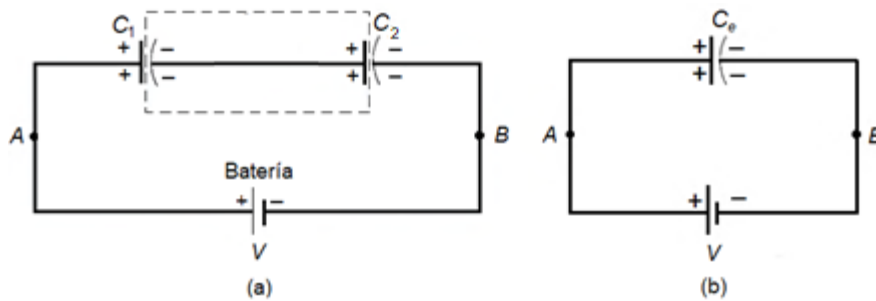
ya que todos los capacitores están conectados a la misma diferencia de potencial. Por tanto, dividiendo entre los voltajes se obtiene [1]

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad \text{Conexión en paralelo}$$

Ejemplo:

Determine la capacitancia efectiva de un capacitor de $6\mu F$ y otro de $15\mu F$ conectados (a) en serie y (b) en paralelo.

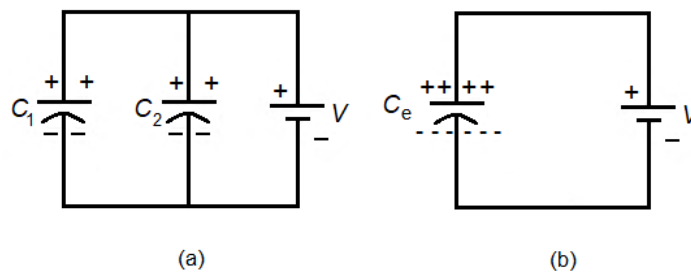
Solución (a)



Aplicando la ecuación para conexión serie de dos capacitores

$$C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(6\mu F)(15\mu F)}{6\mu F + 15\mu F} = 4.28 \mu F$$

Solución (b)



Aplicando la ecuación para conexión en paralelo

$$C = C_1 + C_2 = 6\mu F + 15\mu F = 21\mu F$$

2.6 Capacitores serie-paralelo

Los capacitores serie-paralelo son una mezcla de capacitores que, al ubicarlos en un circuito, llegan a formar diferentes combinaciones de capacitores agrupados de tal forma que la circulación de corriente no se hace en un solo sentido a lo largo de su trayectoria. La tabla 3 resume las fórmulas para la solución de los ejercicios de capacitores serie-paralelo. [1]

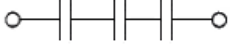
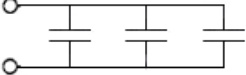
Tipo de circuito	Circuitos en serie	Circuitos en paralelo
		
Carga Q	$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$	$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Voltaje V	$V = V_1 + V_2 + V_3$	$V = V_1 = V_2 = V_3$
Capacitancia equivalente	$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$	$C_e = C_1 + C_2 + C_3$
Capacitancia para dos elementos	$C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$C_e = C_1 + C_2$

Tabla 3 Fórmulas para los capacitores conectados en serie y en paralelo.
Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Ejemplo

- Determine la capacitancia equivalente del circuito que aparece en la figura 18a.
- Determine la carga de cada condensador,
- ¿Cuál es el voltaje que hay en el condensador de $4\mu F$?

Plan: Empezaremos en la región más alejada de la fuente de voltaje usando las reglas para combinar capacitores en paralelo y en serie. De esta forma, obtendremos circuitos cada vez más sencillos hasta obtener una sola capacitancia equivalente en serie con la fuente. La carga en toda la red y a través de cada condensador que hay en ella se determina con base en el hecho

de que $Q = CV$ y el conocimiento de cómo se distribuye el voltaje en capacitores conectados en serie y en paralelo.

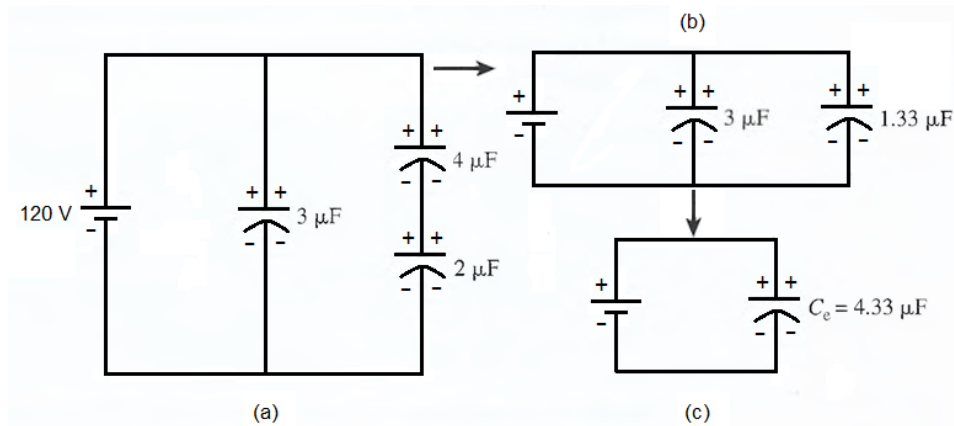


Figura 18 Simplificación de un problema sustituyendo valores equivalentes por capacitancia.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Solución (a):

Los condensadores de $4\mu F$ y $2\mu F$ están en serie. Determinamos su capacitancia combinada a partir de

$$C_{24} = \frac{C_2 C_4}{C_2 + C_4} = \frac{(2\mu F)(4\mu F)}{2\mu F + 4\mu F} = 1.33\mu F$$

Estos dos capacitores pueden sustituirse por su capacitancia equivalente, como se muestra en la figura 18b. Los dos condensadores restantes están conectados en paralelo; por tanto, la capacitancia equivalente es

$$C_e = C_3 + C_{24} = 3\mu F + 1.33\mu F = 4.33\mu F$$

Solución (b):

La carga total dentro de la red es

$$Q = C_e V = (4.33\mu F)(120 V) = 520\mu C$$

La carga Q_3 en el capacitor de $3\mu F$ es

$$Q_3 = C_3 V = (3\mu F)(120 V) = 360\mu C$$

El resto de la carga,

$$Q - Q_3 = 520\mu C - 360\mu C = 160\mu C$$

debe depositarse en los capacitores en serie. Luego

$$Q_2 = Q_4 = 160\mu C$$

Para comprobar estos valores para Q_2 y Q_4 , la capacitancia equivalente de las dos series de capacitores se multiplica por la caída de voltaje correspondiente:

$$Q_{24} = C_{24} V = (1.33\mu F)(120 V) = 160\mu C$$

Solución (c):

El voltaje a través del capacitor de $4\mu F$ es

$$V_4 = \frac{Q_4}{C_4} = \frac{160\mu C}{4\mu F} = 40 V$$

Los $80 V$ restantes corresponden a la caída de voltaje a través del condensador de $2\mu F$

2.7 Energía almacenada en un capacitor

Muchas de las aplicaciones más importantes de los capacitores dependen de su capacidad para almacenar energía. La energía potencial eléctrica almacenada en un capacitor cargado es exactamente igual a la cantidad de trabajo requerido para cargarlo, es decir, para separar cargas opuestas y colocarlas en los diferentes conductores. Cuando el capacitor se descarga, esta 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 . Estas cantidades están relacionadas de la siguiente forma

$$V = \frac{Q}{C}$$

Sean q y v la carga y la diferencia de potencial, respectivamente, en una etapa intermedia del proceso de carga; entonces, $v = q/C$. En esta etapa, el trabajo dW que se requiere para transferir un elemento adicional de carga dq es

$$dW = v dq = \frac{q dq}{C}$$

El trabajo total W necesario para incrementar la carga q del capacitor, de cero a un valor final Q , es

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

Esto también es igual al trabajo total realizado por el campo eléctrico sobre la carga cuando el capacitor se descarga. Entonces, q disminuye desde un valor inicial Q hasta cero conforme los elementos de carga dq "caen" a través de las diferencias de potencial v que varían desde V hasta cero.

Si se define la energía potencial de un capacitor sin carga como igual a cero, entonces W en la es igual a la energía potencial U del capacitor con carga. La carga final almacenada es $Q = CV$, por lo que U (que es igual a W) se expresa como

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

Cuando Q está en coulombs, C en farads (coulombs por volt) y V en volts (joules por coulomb), U queda expresada en joules.

La ecuación, $U = \frac{1}{2}QV$, muestra que el trabajo W que se requiere para cargar el capacitor es igual a la carga total Q multiplicada por la diferencia de potencial *promedio* $\frac{1}{2}V$ durante el proceso de carga.

La expresión $U = \frac{1}{2}(Q^2/C)$ indica que un capacitor con carga es el análogo eléctrico de un resorte estirado con energía potencial elástica $U = \frac{1}{2}kx^2$. La carga Q es análoga a la elongación x , y el recíproco de la capacitancia, $1/C$, es análogo a la constante k de la fuerza. La energía suministrada a un capacitor en el proceso de carga es análoga al trabajo que se realiza sobre un resorte al estirarlo.

Las ecuaciones plantean que la capacitancia mide la facultad de un capacitor para almacenar tanto energía como carga. Si un capacitor se carga conectándolo a una batería o a otra fuente que suministre una diferencia de potencial fija V , entonces un incremento en el valor de C da una carga mayor $Q = CV$ y una cantidad más grande de energía almacenada $U = \frac{1}{2}CV^2$. Si en vez de lo anterior, el objetivo es transferir una cantidad dada de carga Q de un conductor al otro, la indica que el trabajo W requerido es inversamente proporcional a C ; cuanto mayor sea la capacitancia, más fácil será dar a un capacitor una cantidad fija de carga. [2]

UNIDAD 3 Electrodinámica

Competencias

Específica:

Resuelve y construye circuitos con resistencias y fuentes de voltaje de cc aplicando las Leyes de Ohm y Kirchhoff (mallas y nodos) para calcular, voltajes y corrientes.

Genéricas:

- Toma de decisiones
- Habilidades interpersonales
- Habilidad para trabajar en forma autónoma

3.1 Corriente eléctrica

Una corriente eléctrica es todo movimiento de carga de una región a otra. Estudiaremos las corrientes en los materiales conductores. La gran mayoría de aplicaciones tecnológicas de cargas en movimiento implican corrientes de este tipo.

En situaciones electrostáticas, el campo eléctrico dentro de un conductor es igual a cero, y no hay corriente. Sin embargo, esto no significa que todas las cargas en el interior del conductor estén en reposo. En un metal común, como el cobre o el aluminio, algunos de los electrones están en libertad para moverse dentro del material conductor. Estos electrones libres se mueven al azar en todas direcciones, en forma parecida a como lo hacen las moléculas de un gas, sólo que, con una rapidez mucho mayor, del orden de 10^6 m/s. No obstante, los electrones no escapan del material conductor, ya que son atraídos hacia los iones positivos del material. El

movimiento de los electrones es aleatorio, por lo que no hay un flujo neto de carga en ninguna dirección y por consiguiente, no existe corriente.

Ahora, considere lo que pasa si se establece un campo eléctrico \vec{E} constante y estable dentro de un conductor. En ese caso, una partícula con carga (como un electrón libre) en el interior del material conductor se somete a una fuerza estable $\vec{F} = q\vec{E}$. Si la partícula con carga se moviera en el vacío, esta fuerza estable ocasionaría una aceleración estable en dirección de \vec{F} y después de cierto tiempo la partícula con carga se desplazaría en esa dirección con gran rapidez. Pero una partícula con carga en movimiento en un *conductor* experimenta colisiones frecuentes con los iones masivos y casi estacionarios del material. En cada colisión, la dirección en que se mueve la partícula sufre un cambio aleatorio. El efecto neto del campo eléctrico \vec{E} es que, además del movimiento al azar de las partículas con carga dentro del conductor, también hay un movimiento neto muy lento o deriva de las partículas con carga que se desplazan como grupo en dirección de la fuerza eléctrica $\vec{F} = q\vec{E}$ (figura 19). Este movimiento queda descrito en términos de la velocidad de deriva \vec{v}_d de las partículas. Como resultado, existe una corriente neta en el conductor.

Si bien el movimiento aleatorio de los electrones tiene una rapidez media muy grande, alrededor de 10^6 m/s , la rapidez de deriva es muy baja, con frecuencia del orden de 10^{-4} m/s . Como los electrones se mueven con tanta lentitud, tal vez se pregunte por qué la luz se enciende de inmediato cuando se activa el interruptor de una linterna. La razón es que el campo eléctrico se establece en el alambre conductor con una rapidez cercana a la de la luz, y los electrones comienzan a desplazarse a todo lo largo del alambre casi al mismo tiempo. En realidad, no es muy relevante el tiempo que toma a cualquier electrón individual trasladarse del interruptor a la bombilla. Una buena analogía es un grupo de soldados a la espera de la orden de un sargento para comenzar a marchar; la orden llega a oídos de los soldados con la rapidez del sonido, que es mucho mayor que aquella a que marchan, por lo que los soldados comienzan a marchar prácticamente al unísono.

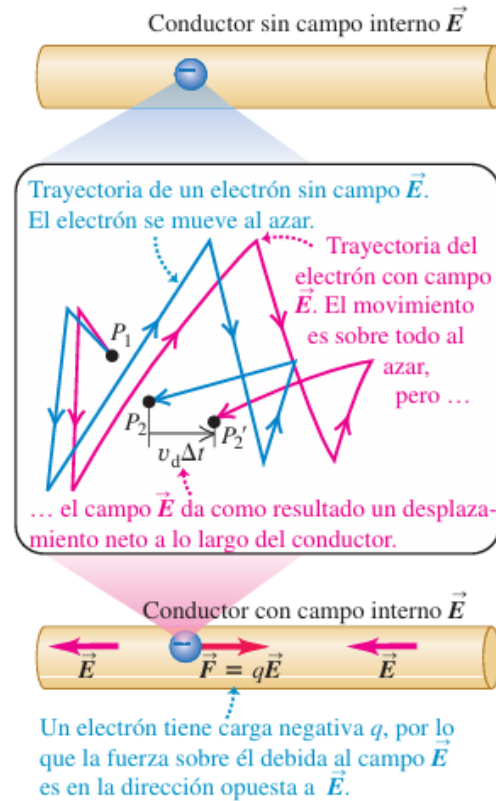


Figura 19 Si no hay campo eléctrico en el interior de un conductor, no habrá circulación de electrones.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39)* (10th ed.). Pearson.

Dirección del flujo de corriente.

La deriva de las cargas en movimiento a través de un conductor puede interpretarse en términos de trabajo y energía. El campo eléctrico \vec{E} efectúa trabajo sobre las cargas en movimiento. La energía cinética resultante se transfiere al material del conductor por medio de colisiones con los iones, los cuales vibran en torno a sus posiciones de equilibrio en la estructura cristalina del conductor. Esta transferencia de energía incrementa la energía media de vibración de los iones y, por lo tanto, la temperatura del material. Así, gran parte del trabajo realizado por el campo eléctrico se dedica a calentar el conductor, no a hacer que las cargas se muevan cada vez más rápido. Este calentamiento a veces resulta útil, como en el caso de un tostador eléctrico, pero en muchas situaciones es tan sólo un subproducto inevitable del flujo de la corriente. En distintos materiales que conducen corriente, las cargas de las partículas en movimiento son positivas o

negativas. En los metales las cargas en movimiento siempre son electrones (negativos), mientras que en un gas ionizado (plasma) o una solución iónica, las cargas en movimiento incluyen tanto electrones como iones con carga positiva. En un material semiconductor, como el germanio o el silicio, la conducción ocurre en parte por los electrones y en parte por el movimiento de las vacantes, también llamadas huecos, que son sitios donde se pierden electrones y actúan como cargas positivas.

La figura 20 presenta segmentos de dos materiales diferentes portadores de corriente. En la figura 20a, las cargas en movimiento son positivas, la fuerza eléctrica ocurre en la misma dirección que \vec{E} , y la velocidad de deriva \vec{v}_d es de izquierda a derecha. En la figura 20b las cargas son negativas, la fuerza eléctrica es opuesta a \vec{E} , y la velocidad de deriva \vec{v}_d es de derecha a izquierda. En ambos casos hay un flujo neto de carga positiva de izquierda a derecha, y las cargas positivas terminan a la derecha de las negativas. Definimos que la corriente, denotada por I , va en la dirección en la que hay un flujo de carga positiva. Por ello, las corrientes se describen como si consistieran por completo en un flujo de cargas positivas, aun en los casos en que se sabe que la corriente real se debe a electrones. Así, en las figuras 20a y 20b la corriente es hacia la derecha. Esta convención sobre la dirección del flujo de la corriente se llama corriente convencional. Aunque la dirección de la corriente convencional no es necesariamente la misma en que se desplazan en realidad las partículas con carga, veremos que el signo de las cargas en movimiento tiene poca importancia en el análisis de los circuitos eléctricos.

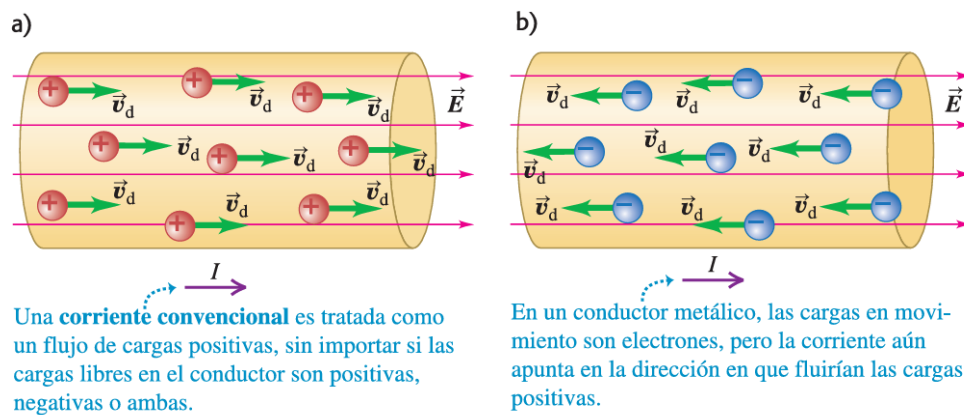


Figura 20 Corriente real y corriente convencional.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La figura 21 muestra un segmento de conductor por el que fluye una corriente. Se considera que las cargas en movimiento son positivas, por lo que se mueven en la misma dirección que la corriente. Definimos la corriente a través del área de sección transversal A como *la carga neta que fluye a través del área por unidad de tiempo*. De esta forma, si una carga neta dQ fluye a través de un área en el tiempo dt , la corriente I a través del área es

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{definición de corriente})$$

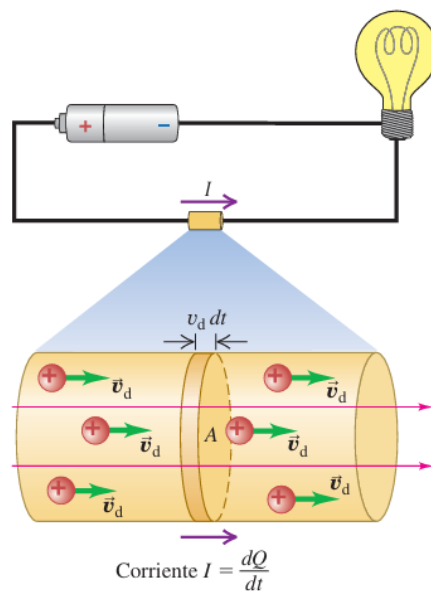


Figura 21 La corriente I es la tasa de transferencia de carga a través del área de sección transversal A .

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La unidad del *SI* para la corriente es el Ampère, un ampere se define como un *coulomb por segundo* ($1A = 1C/s$). Esta unidad recibe su nombre en honor del científico francés André Marie Ampère (1775-1836). Cuando se enciende una linterna común (de pilas tamaño D), la corriente en ella es aproximadamente de 0.5 a 1 A; la corriente en los cables del motor de arranque de un automóvil es de alrededor de 200 A. Las corrientes en los circuitos de radio y televisión por lo general se expresan en *miliamperes* ($1 mA = 10^{-3}A$) o *microamperes* ($1 \mu A = 10^{-6}A$) y las corrientes en los circuitos de computadoras son del orden de *nanoamperes* ($1 nA = 10^{-9}A$) o *picoamperes* ($1 pA = 10^{-12}A$). [2]

La corriente *por unidad de área de la sección transversal* se denomina **densidad de corriente J**:

$$J = \frac{I}{A}$$

Las unidades de la densidad de corriente son amperes por metro cuadrado (A/m^2).

3.2 Fuentes de fuerza electromotriz: pilas y baterías

Una pila es un dispositivo que transforma la energía química en energía eléctrica. Una batería es un agrupamiento de dos o más pilas unidas en serie o en paralelo. Una muy usada en radios portátiles, lámparas de mano o rasuradoras eléctricas es la pila seca que produce una fuerza electromotriz (*fem*) de 1.5 V entre sus terminales. En la figura 22 se describe la constitución de una pila seca.

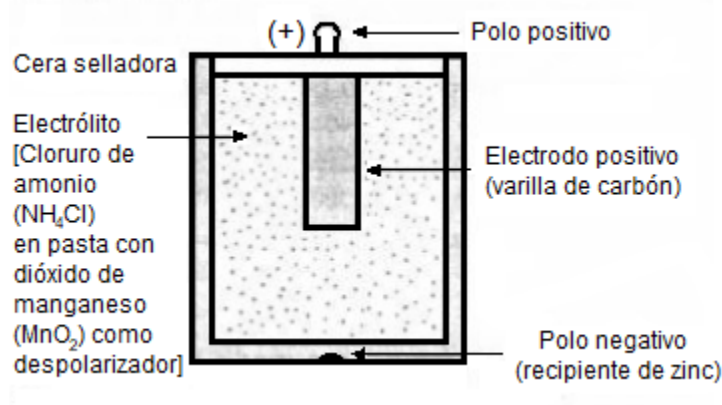


Figura 22 Corte seccional de una pila seca.

Fuente: Montiel, P., & Héctor. (2020). *Física general*. Grupo Editorial Patria.

La conexión de pilas en serie se efectúa al unir el polo positivo de una, con el polo negativo de la otra y así sucesivamente de acuerdo con la fem, que se desea obtener. Figura 23.

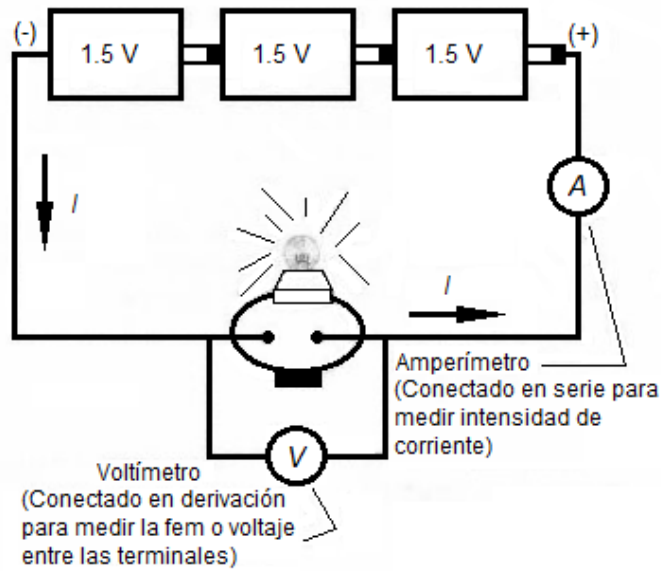


Figura 23 Conexión de pilas en serie $V_T = V_1 + V_2 + V_3 = 4.5 V$
 Fuente: Montiel, P., & Héctor. (2020). Física general. Grupo Editorial Patria.

La conexión de pilas en paralelo se realiza al enlazar, por una parte, todos los polos positivos y por la otra, todos los polos negativos. En la figura 24, se muestra una conexión en paralelo. El resultado obtenido al medir la diferencia de potencial entre las terminales de la conexión es el mismo que se tiene al medir la diferencia de potencial de cualquiera de las pilas conectadas, sin embargo, al medir la intensidad de la corriente eléctrica se observará que aumenta su valor. [6]

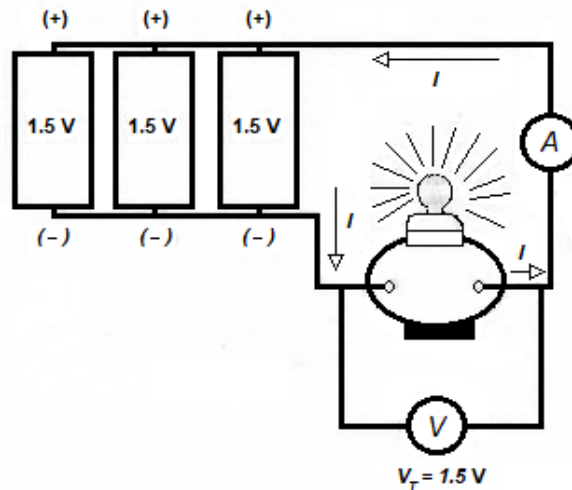


Figura 24 Conexión de pilas en paralelo $V_T = V_1 = V_2 = V_3 = 1.5 V$
 Fuente: Montiel, P., & Héctor. (2020). Física general. Grupo Editorial Patria.

3.3 Resistencia

La **resistencia** (R) se define como la oposición a que fluya la carga eléctrica. Aunque la mayoría de los metales son buenos conductores de electricidad, todos ofrecen cierta oposición a que el flujo de carga eléctrica pase a través de ellos. Esta resistencia eléctrica es fija para gran número de materiales específicos, de tamaño, forma y temperatura conocidos. Es independiente de la fem aplicada y de la corriente *que* pasa a través de ellos.

El primero en estudiar cuantitativamente los efectos de la resistencia para limitar el flujo de carga fue Georg Simón Ohm, en 1826. Él descubrió que, *para un resistor dado, a una temperatura particular, la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado*. Así como la rapidez de flujo de agua entre dos puntos depende de la diferencia de altura que haya entre ambos, la rapidez de flujo de la carga eléctrica entre dos puntos depende de la diferencia de potencial que existe entre ellos. Esta proporcionalidad se conoce, en general, como la **Ley de Ohm**:

La corriente que circula por un conductor dado es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus puntos extremos.

Por tanto, la corriente I que se observa con un voltaje V es un indicio de la resistencia. Matemáticamente, la resistencia R de un conductor dado se puede calcular a partir de

$$R = \frac{V}{I} \quad V = IR \quad \text{Ley de Ohm.}$$

Cuanto mayor sea la resistencia R , tanto menor será la corriente I para un voltaje dado V . La unidad de medición de la resistencia es el *ohm*, cuyo símbolo es la letra griega mayúscula omega (Ω). Dada la ecuación anterior

$$1 \Omega = \frac{1 V}{1 A}$$

Una resistencia de *un ohm* permitirá una corriente de *un ampere* cuando se aplica a sus terminales una diferencia de potencial de *un volt*.

Hay cuatro dispositivos que se usan a menudo en el laboratorio para estudiar la Ley de Ohm. Ellos son: la batería, el voltímetro, el amperímetro y el reóstato. Como su nombre lo indica, el voltímetro y el amperímetro son dispositivos para medir el voltaje y la corriente. El reóstato es simplemente un resistor variable. Un contacto que se puede deslizar cambia el número de espiras de la resistencia a través de la cual fluye la carga. En la figura 25 se ilustra una colección de laboratorio de estos aparatos eléctricos. Conviene que estudie el diagrama del circuito de la figura 25a y que justifique las conexiones eléctricas que se aprecian en la figura 25b. Note que el voltímetro está conectado en paralelo con la batería: positivo con positivo y negativo con negativo; mientras que el amperímetro, el cual debe leer la corriente a través del circuito, está conectado en serie: positivo a negativo a positivo a negativo. [1]

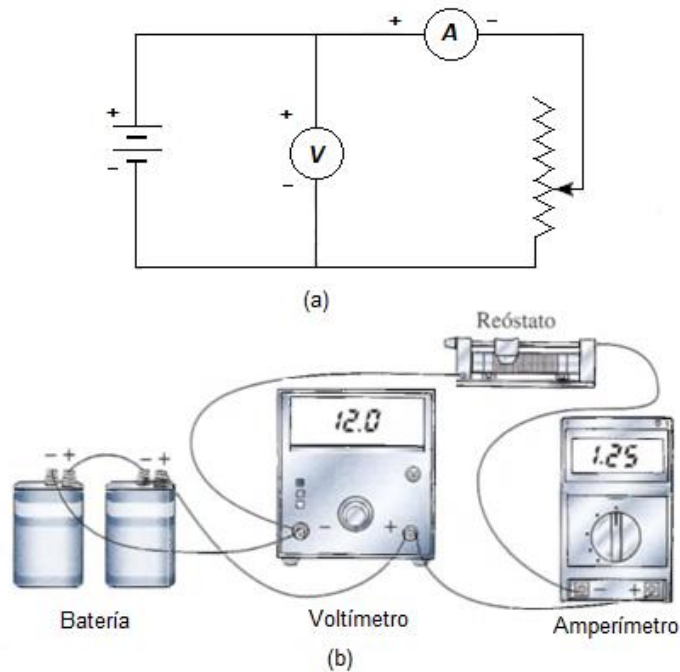


Figura 25 (a) Diagrama de un circuito que permite estudiar la ley de Ohm. (b) Diagrama ilustrativo que muestra de qué modo se conectan los diversos elementos de un circuito en el laboratorio.

Fuente: Tippens, P. (2000). Física - Conceptos y Aplicación 5b Edición. McGraw-Hill Companies.*

3.3.1 Resistividad

En términos simples, la resistividad es la resistencia eléctrica específica de un determinado material y es el recíproco (inverso) de la conductividad. Se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$) y se define a partir de la densidad de corriente en el material resistivo causado por el campo eléctrico en un punto en particular.

Cada uno de los materiales cuenta con una resistividad específica a temperatura ambiente.

La resistividad es una propiedad básica de todos los materiales, de manera que mide la oposición (resistencia) que ejerce el material (conductor) al flujo de corriente. Está estrechamente vinculada al comportamiento de las partículas internas, su vibración, composición atómica y otras variables microscópicas.

Ahora bien, dado que la resistividad corresponde a la reacción de un determinado material al paso de corriente eléctrica, resulta un índice fiable de la calidad de ese material en cuanto a sus propiedades como conductor. En otras palabras, alta resistividad implica baja conducción y viceversa. [7]

3.3.2 Factores que afectan la resistividad

Al igual que la capacitancia es independiente del voltaje y de la cantidad de carga, la resistencia de un conductor es independiente de la corriente y del voltaje. Tanto la capacitancia como la resistencia son propiedades inherentes a un conductor. La resistencia de un alambre que tiene un área de sección transversal uniforme, como el que muestra la figura 26, se determina por los cuatro factores siguientes:

1. Tipo de material
2. Longitud
3. Área de sección transversal
4. Temperatura

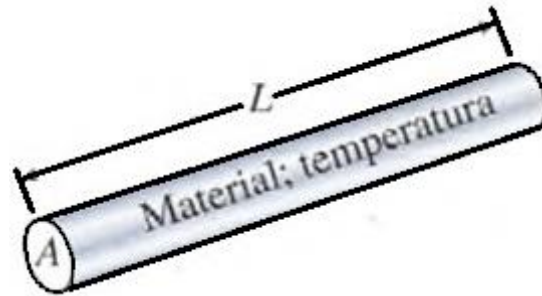


Figura 26 La resistencia de un alambre depende de la clase de material, su longitud, el área de su sección transversal y su temperatura.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Ohm, el físico alemán que descubrió la ley que ahora lleva su nombre, informó también que la resistencia de un conductor a una temperatura dada es directamente proporcional a su longitud, e inversamente proporcional al área de su sección transversal y depende del material del cual está hecho. Para un conductor dado, a una temperatura determinada, la resistencia se puede calcular a partir de

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde

R = resistencia

L = longitud

A = área

La constante de proporcionalidad ρ es una propiedad del material llamada resistividad, dada por

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

La resistividad varía considerablemente de acuerdo con el tipo de material y también se ve afectada por cambios de temperatura. Cuando R está en ohms, A en metros cuadrados y L en metros, la unidad de resistividad es el ohm-metro ($\Omega - m$):

$$\frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$$

En la tabla 4 se muestra la resistividad de algunos metales muy comunes

Resistividades y coeficientes de temperatura a 20°C

Material/Propiedades	Resistividad $\Omega \cdot m$	Coefficiente de temperatura de la resistencia $1/^\circ C$
Aluminio	2.8×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Constantán	49×10^{-8}	—
Cobre	1.72×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Hierro	9.5×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Nicromo	100×10^{-8}	0.4×10^{-3}
Oro	2.4×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Plomo	10×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Plata	1.6×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Tungsteno	5.5×10^{-8}	4.5×10^{-3}

Tabla 4 Resistividades y coeficientes de temperatura a 20°C

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Ejemplo

Un alambre de cobre de 20 m de longitud tiene 0.8 mm de diámetro. Los extremos del alambre se colocan a través de las terminales de una batería de 1.5 V. ¿Qué corriente pasa por el alambre?

Plan: Calcularemos el área del alambre y luego calcularemos la resistencia de la longitud y la resistividad del cobre. Con la ley de Ohm obtendremos la corriente.

Solución: El área del alambre es

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(8 \times 10^{-4})^2}{4} = 5.0265 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Resolvemos para la resistencia

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{(1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m})(20 \text{ m})}{5.0265 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 0.6843 \Omega$$

Finalmente, a partir de la ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.5 \text{ V}}{0.6843 \Omega} = 2.19 \text{ A}$$

Coefficiente de temperatura de la resistencia.

Para la mayoría de los conductores metálicos, la resistencia tiende a aumentar con un incremento de temperatura. Cuando aumenta el movimiento atómico y molecular en el conductor, se obstaculiza el flujo de carga. El incremento en la resistencia para la mayoría de los metales es aproximadamente lineal cuando se compara con los cambios de temperatura. Los experimentos han mostrado que el aumento en la resistencia ΔR es proporcional a la resistencia inicial R_0 y al cambio en la temperatura Δt . Podemos escribir

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta t$$

La constante α es una característica del material y se conoce como coeficiente de temperatura de la resistencia. La ecuación para definir α se puede determinar de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}$$

El coeficiente de temperatura de la resistencia es el cambio en la resistencia, por unidad de resistencia, por cada grado de cambio en la temperatura.

Puesto que las unidades de ΔR y R_0 son las mismas, la unidad del coeficiente α es grados inversos ($1/^\circ C$). Los coeficientes de varios materiales comunes se proporcionan en la tabla 4. [1]

Ejemplo

Un alambre de hierro tiene una resistencia de 200Ω a $20^\circ C$. ¿Cuál será su resistencia si se calienta a $80^\circ C$?

Plan: Primero se calcula el cambio en la resistencia tomando de la tabla 4 el cambio de temperatura y el coeficiente de temperatura para el hierro.

Solución: El cambio en la resistencia ΔR se determina a partir de la ecuación

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta t$$

$$\Delta R = \left(\frac{0.005}{^\circ C} \right) (200 \Omega) (80^\circ C - 20^\circ C) = 60 \Omega$$

Por tanto, la resistencia a $80^\circ C$ es

$$R = R_0 + \Delta R = 200 \Omega + 60 \Omega = 260 \Omega$$

El incremento en la resistencia de un conductor a causa de la temperatura es lo suficientemente grande como para medirlo con facilidad. Este hecho se aprovecha en los termómetros de resistencia para medir temperaturas con bastante exactitud. Debido al alto punto de fusión de algunos metales, los termómetros de resistencia se pueden usar para medir temperaturas extremadamente altas.

3.3.3 Código de colores

Código de Colores para las resistencias. Una resistencia de carbón típico regularmente tiene 4 bandas de colores, las cuales nos ayudan a calcular el valor en Ohms (Ω) de la resistencia. Las bandas se leen de izquierda a derecha; las tres primeras bandas nos dan la magnitud de la resistencia y la cuarta banda la tolerancia (o precisión)

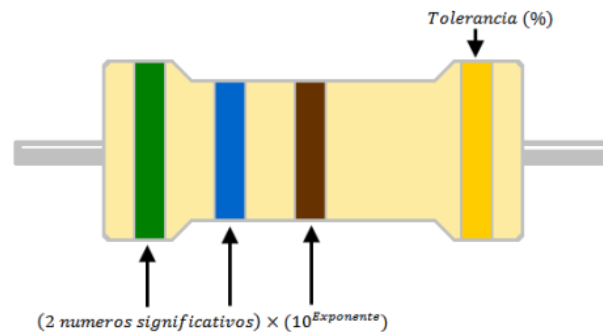


Figura 27 Configuración de resistencia eléctrica.

Fuente: Código de Colores para los resistores. Unam.Mx. Retrieved August 2, 2024, from http://dcb.fic.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/docs/CC_Resistores.pdf

Para obtener el valor de la resistencia nos referimos a la Tabla 5 para obtener los dos dígitos significativos y con la tercera banda podemos saber el valor del exponencial; la cuarta banda (Tabla 6) nos dice el valor de precisión de la resistencia. En este ejemplo: La primera banda es color verde = 5, y la segunda es azul = 6, la tercera banda tiene un valor de 1 (marrón), por lo tanto:

$$(56) \times 10^1 = 560 \Omega$$

La cuarta banda nos informa que tenemos una tolerancia de $\pm 5\%$.

Por lo tanto, leemos:

$$560 \Omega \pm 5\%$$

<u>1a Banda</u>	<u>2a Banda</u>	<u>3a Banda</u>	
1er Dígito	2º Dígito	Exponente	Color
--	0	--	Negro
1	1	10^1	Marrón
2	2	10^2	Rojo
3	3	10^3	Naranja
4	4	10^4	Amarillo
5	5	10^5	Verde
6	6	10^6	Azul
7	7	--	Morado
8	8	--	Gris
9	9	--	Blanco
		10^{-1}	Dorado
		10^{-2}	Plateado

Tabla 5 Código de Colores para resistencias de 4 bandas.

Fuente: Código de Colores para los resistores. Unam.Mx. Retrieved August 2, 2024, from http://dcb.fic.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/docs/CC_Resistores.pdf

<u>4a Banda</u>	
Tolerancia	Color
1%	Marrón
2%	Rojo
0.50%	Verde
0.25%	Azul
0.10%	Morado
0.05%	Gris
5%	Dorado
10%	Plateado

Tabla 6 Valores de Tolerancia.

Fuente: Código de Colores para los resistores. Unam.Mx. Retrieved August 2, 2024, from http://dcb.fic.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/docs/CC_Resistores.pdf

Una forma alternativa de realizar las lecturas es considerar que la primera banda nos da el valor de las decenas y la segunda el valor de las unidades; la tercera banda sigue siendo el valor del exponente, de esta forma podemos realizar la lectura como:

$$(Decenas + Unidades) \times (10^{\text{exponente}})$$

Por cuestiones prácticas, solo se fabrican ciertos valores normalizados de resistencias, de modo que con las combinaciones de estos (resistencias en serie o paralelo) se pueda lograr obtener cualquier valor de resistencia que necesitemos. Los valores comerciales actualmente disponibles en el mercado se muestran en la tabla 7. [8]

Colores (Banda 1 y 2)		Exponencial (3a Banda)							
		Oro	Negro	Marrón	Rojo	Naranja	Amarillo	Verde	
Marrón	Negro	1.0	10	100	1000	10000	100000	1000000	
Marrón	Rojo	1.2	12	120	1200	12000	120000	1200000	
Marrón	Verde	1.5	15	150	1500	15000	150000	1500000	
Marrón	Gris	1.8	18	180	1800	18000	180000	1800000	
Rojo	Rojo	2.2	22	220	2200	22000	220000	2200000	
Rojo	Morado	2.7	27	270	2700	27000	270000	2700000	
Naranja	Naranja	3.3	33	330	3300	33000	330000	3300000	
Naranja	Blanco	3.9	39	390	3900	39000	390000	3900000	
Amarillo	Morado	4.7	47	470	4700	47000	470000	4700000	
Verde	Azul	5.6	56	560	5600	56000	560000	5600000	
Azul	Gris	6.8	68	680	6800	68000	680000	6800000	
Gris	Rojo	8.2	82	820	8200	82000	820000	8200000	
Blanco	Negro	9.1	91	910	9100	91000	910000	9100000	

Tabla 7 Valores Comerciales de Resistencias.

Fuente: Código de Colores para los resistores. Unam.Mx. Retrieved August 2, 2024, from http://dcb.fic.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/docs/CC_Resistores.pdf

3.3.4 Resistencia en serie y en paralelo

Un circuito eléctrico consiste en cierto número de ramas unidas entre sí, de modo que al menos una de ellas cierre la trayectoria que se proporciona a la corriente. El circuito más sencillo consta de una sola fuente de *fem* unida a una sola resistencia externa, como se muestra en la figura 28. Si \mathcal{E} representa la *fem* y R indica la resistencia total, la Ley de Ohm queda como

$$\mathcal{E} = IR$$

donde I es la corriente que circula por el circuito. Toda la energía que se gana mediante una carga que pasa a través de la fuente de *fem* se pierde debido al flujo a través de la resistencia

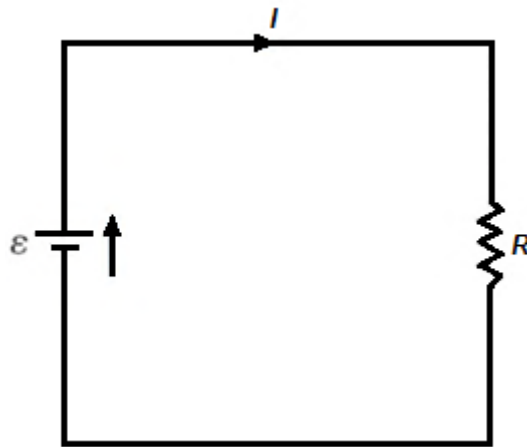


Figura 28 Un circuito eléctrico simple.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Considere la adición de ciertos elementos al circuito. Se dice que dos o más elementos están en *serie* si tienen un solo punto en común que no está conectado a un tercer elemento. La corriente puede fluir únicamente por una sola trayectoria por los elementos en serie. Los resistores R_1 y R_2 de la figura 29a están en serie porque el punto A es común a ambas. Los resistores de la figura 29b, sin embargo, no están en serie, ya que el punto B es común a tres ramales de corriente. Al entrar en tal unión, la corriente eléctrica puede seguir dos trayectorias distintas.

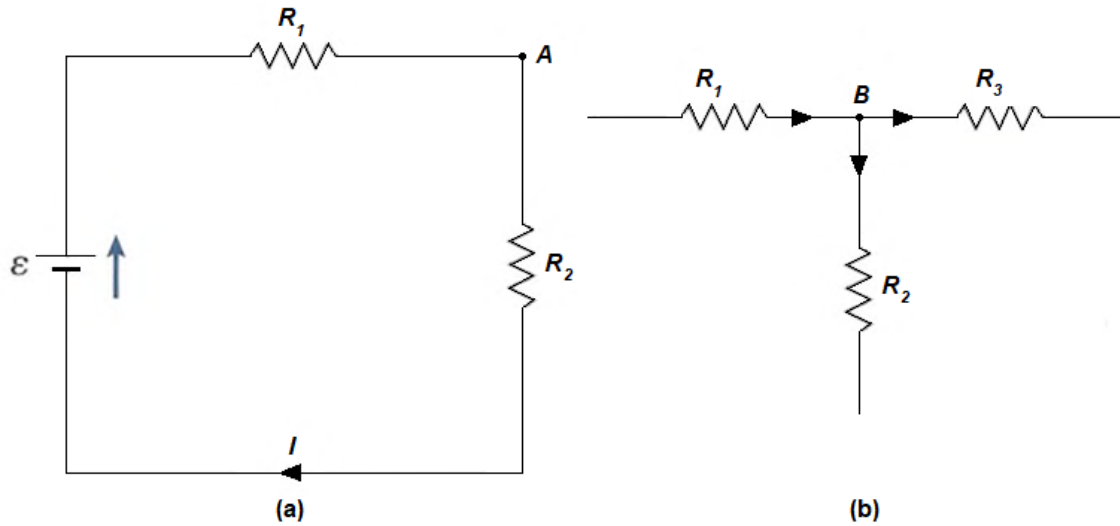


Figura 29 (a) Resistencias conectados en serie, (b) Resistencias no conectados en serie.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Suponga que tres resistores (R_1 , R_2 y R_3) están conectadas en serie y encerrados en una caja, la cual se indica con la parte sombreada en la figura 30. La resistencia efectiva R de los tres resistores se determina a partir de la *fem* (V) y de la corriente (I), registrados en los instrumentos de medición. Con base en la Ley de Ohm

$$R = \frac{V}{I}$$

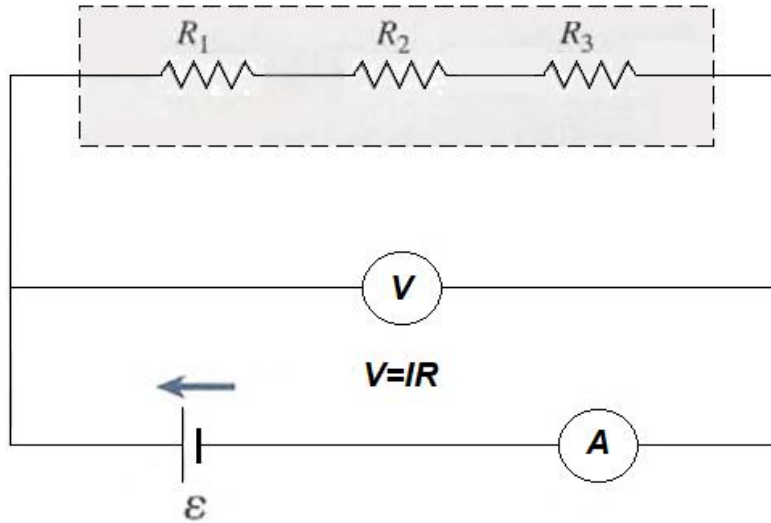


Figura 30 Método del voltímetro-ampereímetro para medir la resistencia efectiva de varias resistencias conectadas en serie.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

¿Cuál es la relación de R respecto a las tres resistencias internas? La corriente que circula por cada resistor debe ser idéntica, puesto que existe una sola trayectoria. En consecuencia,

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

Aprovechando este hecho y considerando que la Ley de Ohm se aplica por igual a cualquier parte del circuito, escribimos

$$V = IR \quad V_1 = IR_1 \quad V_2 = IR_2 \quad V_3 = IR_3$$

El voltaje externo (V) representa la suma de las energías perdidas por unidad de carga al pasar por cada resistencia. Por consiguiente,

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Por último, si sustituimos V en I y dividimos entre la corriente se obtiene

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad \text{en serie.}$$

Para resumir lo que se ha aprendido acerca de los resistores conectados en serie tenemos que:

1. La corriente es igual en cualquier parte de un circuito en serie.
2. La *fem* a través de cierto número de resistencias en serie es igual a la suma de los voltajes correspondientes a cada una de ellas.
3. La resistencia efectiva de cierto número de resistencias en serie es equivalente a la suma de los resistores individuales.

Ejemplo

Las resistencias R_1 y R_2 de la figura 29a son de 2 y 4 Ω . Si la fuente de *fem* mantiene una diferencia de potencial constante de 12 V, ¿qué corriente se suministra al circuito externo? ¿Cuál es la caída de potencial a través de cada resistencia?

Plan: Los resistores están conectadas en serie, de forma que cada una porta la misma corriente, determinada por el voltaje suministrado y la suma de ambas resistencias. Con la aplicación de la Ley de Ohm a cada resistencia se obtiene la caída en cada elemento.

Solución: Para resistencias en serie la resistencia equivalente es

$$R_e = R_1 + R_2 = 2 \Omega + 4 \Omega = 6 \Omega$$

La corriente I que pasa por todo el circuito y por cada resistor es:

$$I = \frac{V}{R_e} = \frac{12 \text{ V}}{6 \Omega} = 2 \text{ A}$$

Las caídas de voltaje en cada resistor son

$$V_1 = I R_1 = (2 A)(2 \Omega) = 4 V$$

$$V_2 = I R_2 = (2 A)(4 \Omega) = 8 V$$

Observe que la suma de las caídas de voltaje ($V_1 + V_2$) es igual a 12 V, la *fem* total aplicado.

Resistencias en paralelo

Hay varias limitaciones en la operación de los circuitos en serie. Si falla un solo elemento de un circuito en serie al proporcionar una trayectoria para el flujo, todo el circuito queda abierto y la corriente se interrumpe. Sería muy molesto que todos los aparatos eléctricos de una casa dejaran de funcionar cada vez que un foco se fundiera. Más aún, cada elemento de un circuito en serie se añade al total de la resistencia del circuito limitando, por tanto, la corriente total que puede ser suministrada. Estas objeciones pueden superarse si se proporcionan otras trayectorias para la corriente eléctrica. Este tipo de conexión, en la que la corriente puede dividirse entre dos o más elementos, se denomina *conexión en paralelo*.

Un *circuito en paralelo* es aquel en el que dos o más componentes se conectan a dos puntos comunes del circuito. Por ejemplo, en la figura 31, los resistores R_2 y R_3 , están en paralelo, pues ambos tienen en común los puntos A y B . Observe que la corriente I , suministrada por una fuente de *fem*, se divide entre los resistores R_2 y R_3 .

Para obtener una expresión para la resistencia equivalente R de cierto número de resistencias conectadas en paralelo seguiremos un procedimiento similar al expuesto para las conexiones en serie. Suponga que se colocan tres resistores (R_1 , R_2 y R_3) dentro de una caja, como aparece en la figura 32.

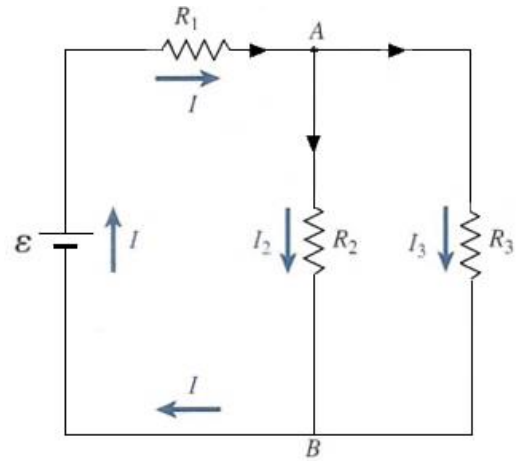


Figura 31 Las resistencias R_2 y R_3 están conectadas en paralelo.
 Fuente: Tippens, P. (2000). Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición. McGraw-Hill Companies.

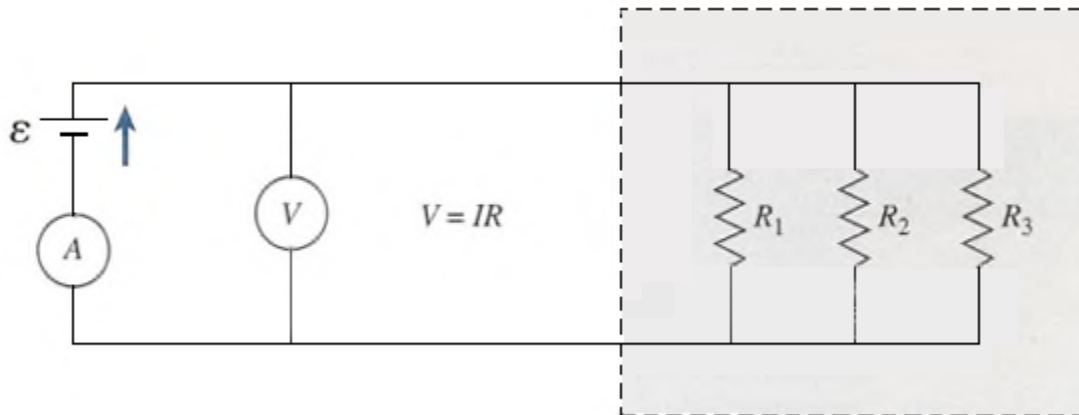


Figura 32 Cálculo de la resistencia equivalente de cierto número de resistencias conectadas en paralelo.
 Fuente: Tippens, P. (2000). Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición. McGraw-Hill Companies.

La corriente total I suministrada a la caja está determinada por su resistencia efectiva y el voltaje aplicado:

$$I = \frac{V}{R}$$

En una conexión en paralelo, la caída de voltaje a través de cada resistor es igual y equivalente a la caída de voltaje total.

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

Esta aseveración se comprueba cuando consideramos que la misma energía debe perderse por unidad de carga, independientemente de la trayectoria seguida en el circuito. En este ejemplo, la carga puede fluir por cualquiera de los tres resistores. Por tanto, la corriente total suministrada se divide entre ellos.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Al aplicar la Ley de Ohm se obtiene

$$\frac{V}{R} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

Pero los voltajes son iguales, y podemos dividir la expresión anterior entre ellos

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{en paralelo}$$

En suma, para resistores en paralelo:

1. La corriente total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las corrientes en los ramales individuales.
2. Las caídas de voltaje a través de todos los ramales del circuito en paralelo deben ser de igual magnitud.

3. El recíproco de la resistencia equivalente es igual a la suma de los recíprocos de las resistencias individuales conectadas en paralelo.

En caso de tener sólo dos resistores en paralelo,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Al resolver algebraicamente esta ecuación para R se obtiene una fórmula simplificada para calcular la resistencia equivalente.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

La resistencia equivalente de dos resistores conectadas en paralelo es igual a su producto dividido entre su suma.

Ejemplo

El voltaje total aplicado al circuito de la figura 33, es de 12 V y las resistencias R_1 , R_2 y R_3 son de 4 , 3 y $6\ \Omega$, respectivamente, (a) Determine la resistencia equivalente del circuito, (b) Determine la corriente que pasa por cada resistor.

Plan: La mejor forma de abordar un problema que contiene resistores tanto en serie como en paralelo es reducir el circuito separándolo en partes hasta su forma más sencilla. En la figura 33 se muestra este método. Los dos resistores en paralelo, R_2 y R_3 se combinan para formar la resistencia equivalente R' , que luego se combina en serie con R_1 para formar una sola resistencia equivalente, R_e , para todo el circuito. Después, con la Ley de Ohm se obtendrá la corriente suministrada por la fuente de fem . Por último, al considerar los voltajes y las resistencias de cada resistor se determinará la corriente de cada elemento.

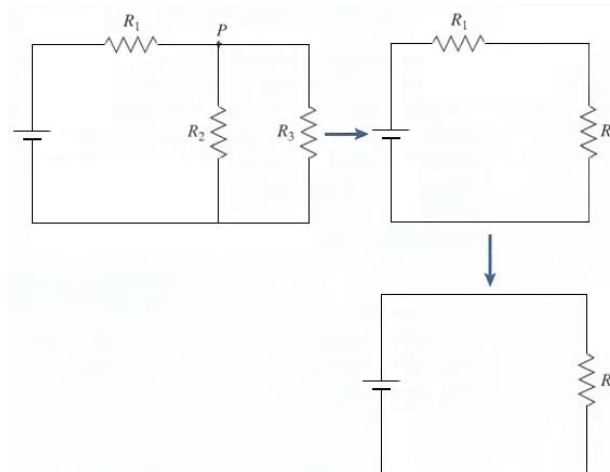


Figura 33 Reducción de un circuito complejo a un circuito equivalente simple.
 Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

Solución (a): La resistencia equivalente R' de los resistores en paralelo se halla con la siguiente ecuación

$$R' = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(3 \Omega)(6 \Omega)}{3 \Omega + 6 \Omega} = 2 \Omega$$

Esta resistencia equivalente R' está en serie con R , de modo que se determina la resistencia equivalente de todo el circuito

$$R_e = R_1 + R' = 4 \Omega + 2 \Omega = 6 \Omega$$

Solución (b): La corriente total suministrada por la fuente de *fem* es

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12 V}{6 \Omega} = 2 A$$

Como las resistencias R_1 y R' están conectadas en serie, tienen la misma corriente que procede de la fuente de *fem*, que es igual a 2 A

$$I_1 = 2 A \quad e \quad I' = 2 A$$

Cuando toda la corriente (2 A) llega al punto P , se divide y parte pasa por R_2 , y el resto por R_3 . Estas corrientes se hallan con la Ley de Ohm. [1]

$$I_2 = \frac{V'}{R_2} = \frac{4 \text{ V}}{3 \Omega} = 1.33 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V'}{R_3} = \frac{4 \text{ V}}{6 \Omega} = 0.66 \text{ A}$$

Observe que $I_2 + I_3 = 2 \text{ A}$, que es la corriente total.

3.4 Ley de Ohm

La resistencia (R) se define como la oposición a que fluya la carga eléctrica. Aunque la mayoría de los metales son buenos conductores de electricidad, todos ofrecen cierta oposición a que el flujo de carga eléctrica pase a través de ellos. Esta resistencia eléctrica es fija para gran número de materiales específicos, de tamaño, forma y temperatura conocidos. Es independiente de la *fem* aplicada y de la corriente que pasa a través de ellos.

El primero en estudiar cuantitativamente los efectos de la resistencia para limitar el flujo de carga fue Georg Simón Ohm, en 1826. Él descubrió que, para un resistor dado, a una temperatura particular, la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado. Así como la rapidez de flujo de agua entre dos puntos depende de la diferencia de altura que haya entre ambos, la rapidez de flujo de la carga eléctrica entre dos puntos depende de la diferencia de potencial que existe entre ellos. Esta proporcionalidad se conoce, en general, como la **Ley de Ohm**:

La corriente que circula por un conductor dado es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus puntos extremos.

Por tanto, la corriente I que se observa con un voltaje V es un indicio de la resistencia. Matemáticamente, la resistencia R de un conductor dado se puede calcular a partir de

$$R = \frac{V}{I} \qquad V = IR \qquad \text{Ley de Ohm}$$

Cuanto mayor sea la resistencia R , tanto menor será la corriente I para un voltaje dado V . La unidad de medición de la resistencia es el **ohm**, cuyo símbolo es la letra griega mayúscula omega (Ω).

$$1 \Omega = \frac{1 V}{1 A}$$

Una resistencia de *un ohm* permitirá una corriente de *un ampere* cuando se aplica a sus terminales una diferencia de potencial de *un volt*.

Hay cuatro dispositivos que se usan a menudo en el laboratorio para estudiar la ley de Ohm. Ellos son: la batería, el voltímetro, el amperímetro y el reóstato. Como su nombre lo indica, el voltímetro y el amperímetro son dispositivos para medir el voltaje y la corriente. El reóstato es simplemente un resistor variable. Un contacto que se puede deslizar cambia el número de espiras de la resistencia a través de la cual fluye la carga. En la figura 34 se ilustra una colección de laboratorio de estos aparatos eléctricos. Conviene que estudie el diagrama del circuito de la figura 34a y que justifique las conexiones eléctricas que se aprecian en la figura 34b. Note que el voltímetro está conectado en paralelo con la batería: positivo con positivo y negativo con negativo; mientras que el amperímetro, el cual debe leer la corriente a través del circuito, está conectado en serie: positivo a negativo a positivo a negativo. [1]

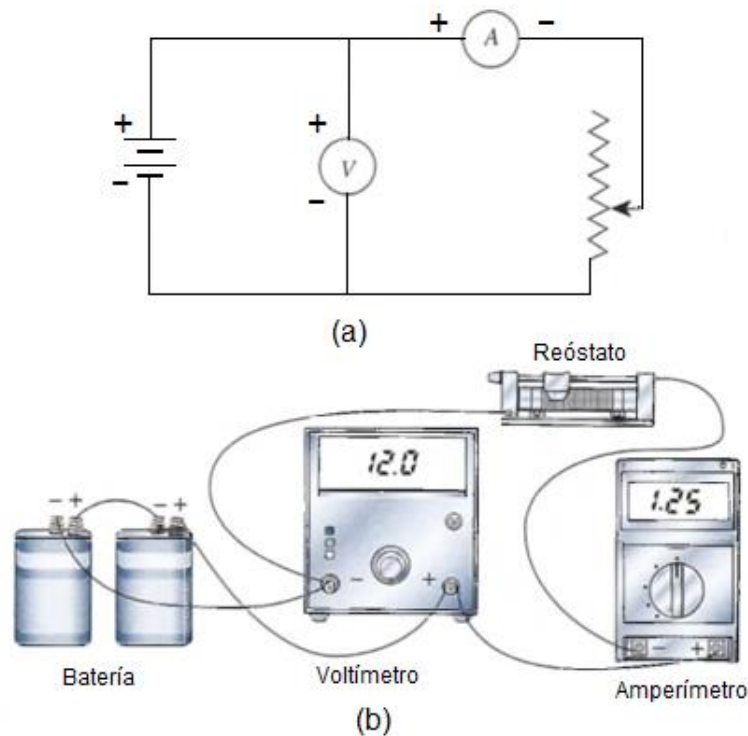


Figura 34 (a) Diagrama de un circuito que permite estudiar la ley de Ohm. (b) Diagrama ilustrativo que muestra de qué modo se conectan los diversos elementos de un circuito en el laboratorio.
 Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Ejemplo

El contacto del reóstato está en la posición que muestra la figura 34. La lectura del voltímetro indica 6.00 V y la del amperímetro, 400 mA . ¿Cuál es la resistencia a través del reóstato? ¿Cuál será la lectura del amperímetro si la resistencia se duplica?

Plan: Conocemos la corriente I y el voltaje V , así que podemos aplicar la ley de Ohm para calcular la resistencia eléctrica. Recuerde usar las unidades básicas del *SI* de volts y amperes. No tomaremos en cuenta ninguna otra resistencia.

Solución (a): Resolvemos la Ley de Ohm para la resistencia R y sustituimos los valores conocidos

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6\text{ V}}{0.4\text{ A}} = 15\ \Omega$$

Solución (b): Al duplicar la resistencia, sustituimos $R = 30\ \Omega$ para obtener

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6\text{ V}}{30\ \Omega} = 0.2\text{ A} \qquad I = 200\text{ mA}$$

3.5 Leyes de Kirchhoff

Muchas redes de resistores prácticas no se pueden reducir a combinaciones sencillas en serie y en paralelo. La figura 35a ilustra una fuente de potencia de cd con fem que carga una batería con fem menor \mathcal{E}_1 y \mathcal{E}_2 y que alimenta corriente a una bombilla con resistencia R . La figura 35b es un circuito “puente”, que se utiliza en muchos tipos diferentes de medición y sistemas de control. No se necesitan principios nuevos para calcular las corrientes en esa clase de redes, pero existen algunas técnicas que ayudan a manejar en forma sistemática los problemas que plantean. A continuación, se describen los métodos desarrollados por el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887).

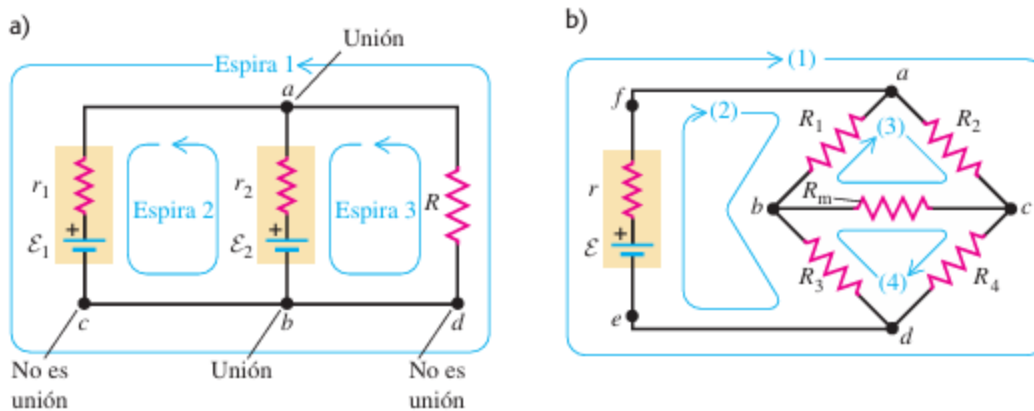


Figura 35 Dos redes que no pueden reducirse a combinaciones simples de resistores en serie o en paralelo.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky’s University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

En primer lugar, hay dos términos que usaremos con frecuencia. Una unión en un circuito es el punto en que se unen tres o más conductores. Las uniones también reciben el nombre de *odos* o *puntos de derivación*. Una espira es cualquier trayectoria cerrada de conducción. En la figura 35a los puntos *a* y *b* son uniones, pero los puntos *c* y *d* no lo son; en la figura 35b, los puntos *a*, *b*, *c* y *d* son uniones, pero los puntos *e* y *f* no lo son. Las líneas en color azul de las figuras 35a y 35b ilustran algunas espiras posibles en estos circuitos.

Las reglas de Kirchhoff consisten en los dos siguientes enunciados:

Regla de Kirchhoff de las uniones: la suma algebraica de las corrientes en cualquier unión es igual a cero. Es decir,

$$\sum I = 0 \quad (\text{Ley de corrientes de Kirchhoff})$$

Regla de Kirchhoff de las espiras: la suma algebraica de las diferencias de potencial en cualquier espira, incluso las asociadas con las *fem* y las de elementos con resistencia, debe ser igual a cero. Es decir,

$$\sum V = 0 \quad (\text{Ley de voltajes de Kirchhoff})$$

La regla de las uniones se basa en la conservación de la carga eléctrica. En una unión no se puede acumular carga eléctrica, por lo que la carga total que entra a ella por unidad de tiempo debe ser igual a la carga total que sale por unidad de tiempo (véase la figura 36a). La carga por unidad de tiempo es corriente, por lo que, si consideramos como positivas las corrientes que entran a una unión y negativas las que salen, la suma algebraica de las corrientes en la unión debe ser igual a cero. Es como un ramal *T* en una tubería de agua (figura 36b); si entra 1 litro por minuto en un tubo, no pueden salir 3 litros por minuto de los otros dos tubos. Hemos de confesar que se usó la regla de las uniones con la finalidad de obtener la ecuación para los resistores en paralelo.

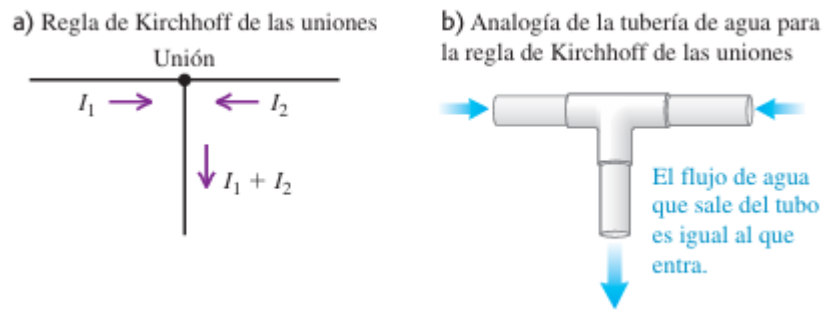


Figura 36 a) La regla de Kirchhoff de las uniones dice que la cantidad de corriente que llega a una unión es igual a la que sale. b) Analogía con una tubería de agua.

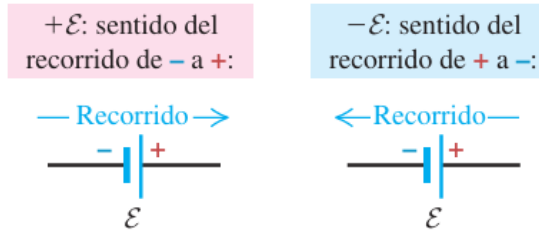
Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La regla de Kirchhoff de las uniones dice que la cantidad de corriente que llega a una unión es igual a la que sale. Suponga que recorre una espira y mide las diferencias de potencial entre los extremos de elementos sucesivos del circuito. Al regresar al punto de partida, debería de encontrar que la suma algebraica de esas diferencias es igual a cero; de lo contrario, no se podría afirmar que el potencial en ese punto tiene un valor definido.

Convenciones de signo para *Ley de voltajes de Kirchhoff*.

Para aplicar *Ley de voltajes de Kirchhoff*, se necesitan algunas convenciones de signos. La Estrategia para resolver el siguiente ejemplo describe en detalle cómo utilizarlas, pero a continuación se da una descripción rápida. Primero suponga un sentido de la corriente en cada ramal del circuito e indíquelo en el diagrama correspondiente. En seguida, a partir de cualquier punto del circuito, realice un recorrido imaginario de la espira sumando las fem y los IR conforme los encuentre. Cuando se pasa a través de una fuente en la dirección de $(- a +)$, la fem se considera positiva; cuando se va de $(+ a -)$, la fem se considera negativa (figura 37a). Cuando se va a través de un resistor en el mismo sentido que el que se supuso para la corriente, el término IR es negativo por que la corriente avanza en el sentido del potencial decreciente. Cuando se pasa a través de un resistor en el sentido opuesto a la corriente que se supuso, el término IR es positivo porque representa un aumento de potencial (figura 37b).

a) Convenciones de signo para las fem



b) Convenciones de signo para los resistores

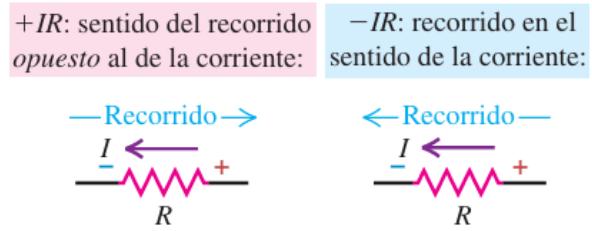


Figura 37 Uso de las convenciones de signos cuando se aplica la regla de Kirchhoff de las espiras. En cada parte de la figura “Recorrido” es el sentido en que imaginamos ir alrededor de la espira, que no necesariamente es el sentido de la corriente.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky’s University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Las dos reglas de Kirchhoff son todo lo que se necesita para resolver una amplia variedad de problemas de redes. Por lo general, algunas de las *fem*, corrientes y resistencias son conocidas y otras no. Siempre se debe obtener de las reglas de Kirchhoff cierto número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas, de manera que sea posible resolverlas simultáneamente. A menudo, la parte más difícil de la solución suele ser, no la comprensión de los principios básicos, sino seguir la pista de los signos algebraicos. [2]

Ejemplo

El circuito mostrado en la figura 38 contiene dos baterías, cada una con una *fem* y una resistencia interna, y dos resistores. Calcule a) la corriente en el circuito, b) la diferencia de potencial V_{ab} y c) la salida de potencia de la *fem* de cada batería.

Solución:

Identificar: Este circuito de una sola espira no tiene uniones, por lo que no se necesita la regla de Kirchhoff de las uniones para determinar el valor de las variables buscadas.

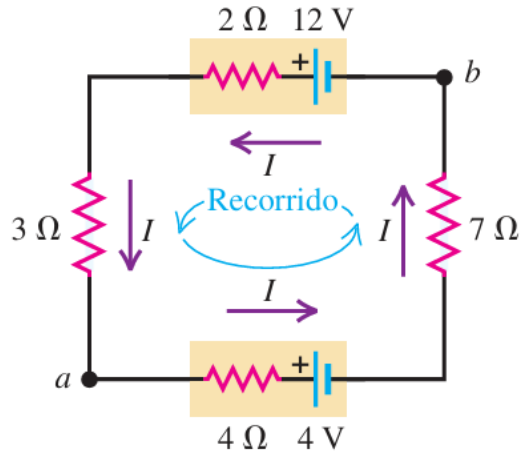


Figura 38 Circuito del ejemplo

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Plantear: Para aplicar la regla de las espiras a la única espira que hay, primero se supone el sentido de la corriente; supongamos un sentido antihorario, como se ilustra en la figura 38.

Ejecutar:

a) Se comienza en a y se va en sentido contrahorario, se suman los incrementos y disminuciones de potencial y se iguala la suma a cero $\sum V = 0$. La ecuación resultante es

$$-I(4 \Omega) - 4 V - I(7 \Omega) + 12 V - I(2 \Omega) - I(3 \Omega) = 0$$

Al reducir los términos que contienen a I y despejar esta variable, se obtiene:

$$8 V = I(16 \Omega) \quad e \quad I = 0.5 A$$

El resultado para I es positivo, lo que demuestra que el sentido elegido para la corriente es correcto. Como ejercicio, suponga para I el sentido opuesto; debería obtener $I = -0.5 A$, lo que indica que la corriente real es opuesta a esa suposición.

b) Para encontrar V_{ab} , el potencial de a con respecto a b , se comienza en b y se suman los cambios de potencial a medida que se avanza hacia a . Hay dos trayectorias posibles de b a a ; primero se toma la inferior y se obtiene:

$$V_{ab} = (0.5 A)(7 \Omega) + 4V + (0.5 A)(4 \Omega) = 9.5 V$$

El punto a tiene un potencial $9.5 V$ más alto que el b . Todos los términos de esta suma, incluidos los IR , son positivos porque cada uno representa un incremento de potencial conforme se pasa de b a a . Si en vez de lo anterior se utiliza la trayectoria superior, la ecuación resultante es:

$$V_{ab} = 12 V - (0.5 A)(2 \Omega) - (0.5 A)(3 \Omega) = 9.5 V$$

Aquí, los términos IR son negativos porque nuestra trayectoria va en el sentido de la corriente, con disminuciones de potencial a través de los resistores. El resultado es el mismo que con la trayectoria inferior, como debe ser para que el cambio total de potencial alrededor de la espira completa sea igual a cero. En cada caso, los aumentos de potencial se toman como positivos, y las caídas como negativas.

c) La salida de potencia de la *fem* de la batería de $12 V$ es

$$P = \mathcal{E}I = (12 V)(0.5 A) = 6 W$$

Y la salida de potencia de la *fem* de la batería de $4 V$ es

$$P = \mathcal{E}I = (-0.4 V)(0.5 A) = -2 W$$

El signo negativo de para la batería de $4 V$ se debe a que la corriente en realidad va del lado de mayor potencial de la batería al de menor potencial. El valor negativo de P significa que en la batería se está almacenando energía, y que se está recargando mediante la batería de $12 V$.

Evaluar: Al aplicar la expresión $P = I^2R$ a cada uno de los cuatro resistores de la figura 38, se debe ser capaz de demostrar que la potencia total disipada en los cuatro resistores es igual a $4 W$. De los $6 W$ que provee la *fem* de la batería de $12 V$, $2 W$ van al almacenamiento de energía en la batería de $4 V$, y $4 W$ se disipan en las resistencias.

El circuito de la figura 38 es muy parecido al que se utiliza cuando se emplea un acumulador de automóvil de $12 V$ para recargar la batería sin carga de otro vehículo. Los resistores de $3 V$ y $7 V$ de la figura 38 representan las resistencias de los cables para pasar corriente y de la trayectoria de conducción a través del automóvil con la batería descargada.

3.6 Divisor de corriente y de voltaje

Divisor de corriente

Un divisor de corriente es una configuración de circuito que distribuye la corriente eléctrica entre dos o más caminos. Es una herramienta esencial en la ingeniería electrónica y se utiliza para dividir la corriente en proporciones específicas. Se verán los conceptos básicos de los divisores de corriente, su funcionamiento y aplicaciones.

Concepto

En un circuito eléctrico, la corriente siempre busca el camino de menor resistencia. Un divisor de corriente se basa en este principio y utiliza resistencias en paralelo para dividir la corriente en varios caminos. La cantidad de corriente que fluye a través de cada camino depende de la resistencia en ese camino particular.

Fórmula

La fórmula del divisor de corriente es una manera sencilla de calcular cuánta corriente fluye a través de cada resistencia en una configuración en paralelo, Figura 39. Supongamos que hay dos resistencias, R_1 y R_2 , en paralelo y queremos calcular la corriente que fluye a través de R_2 . La fórmula sería:

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_T$$

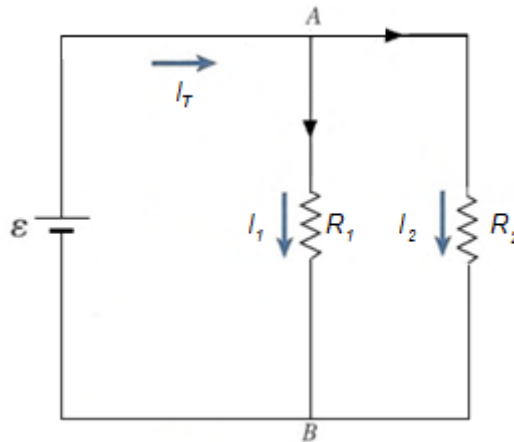


Figura 39 Divisor de corriente.

Fuente: Creación personal.

Aplicaciones

Los divisores de corriente tienen una amplia gama de aplicaciones en la industria electrónica y eléctrica. Se utilizan en circuitos de control, sistemas de distribución de energía, y en muchos otros campos donde se requiere una división precisa de la corriente. Su simplicidad y eficacia los hacen esenciales en el diseño de circuitos modernos.

Características

Un divisor de corriente debe ser diseñado con precisión para asegurar una división adecuada de la corriente. La selección de las resistencias y la disposición de los componentes juegan un papel vital en su eficacia. Las siguientes son algunas de las características clave:

Proporcionalidad: La corriente se divide en proporción a las resistencias.

Simplicidad: Los divisores de corriente son relativamente fáciles de diseñar y construir.

Flexibilidad: Pueden ser diseñados para dividir la corriente en múltiples caminos y en diversas proporciones.

Limitaciones y Precauciones

Aunque los divisores de corriente son herramientas útiles, también tienen sus limitaciones y requieren ciertas precauciones en su uso:

1. La precisión de la división depende de la exactitud de las resistencias utilizadas.
2. La resistencia total debe ser adecuada para evitar la sobrecarga y el daño de los componentes.
3. Los cambios en la temperatura pueden afectar la resistencia y, por lo tanto, la división de la corriente.

Conclusión

Los divisores de corriente son elementos fundamentales en la ingeniería electrónica y eléctrica. A través de una configuración de resistencias en paralelo, permiten la distribución precisa de la corriente en diferentes caminos del circuito. Su aplicación abarca desde el diseño de circuitos complejos hasta sistemas de distribución de energía. A pesar de sus limitaciones y la necesidad de precaución en su diseño y uso, los divisores de corriente continúan siendo una herramienta esencial y versátil en el mundo moderno de la tecnología. La comprensión de su funcionamiento y aplicaciones no solo enriquece el conocimiento en el campo de la electrónica, sino que también abre puertas a innovaciones y mejoras en la eficiencia y el diseño de sistemas eléctricos.

Ejemplo

Calcule la corriente que pasa por R_1 en la figura 39, si $R_1 = 5 \Omega$ y $R_2 = 10 \Omega$ y el voltaje de alimentación es de 12 V.

Plan: Primero calculamos la R_T para determinar la I_T

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(5\Omega)(10\Omega)}{5\Omega + 10\Omega} = 3.33\Omega$$

Posteriormente calculamos I_T .

$$I_T = \frac{\mathcal{E}}{R_T} = \frac{12V}{3.333\Omega} = 3.6A$$

Solución: Utilizamos la fórmula del divisor de corriente

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_T = \left[\frac{10\Omega}{(5\Omega + 10\Omega)} \right] (3.6A) = 2.4A$$

Divisor de voltaje

Introducción

En el mundo de la electricidad, hay muchos conceptos y dispositivos esenciales que hacen posible el funcionamiento de varios sistemas electrónicos. Uno de estos conceptos es el divisor de voltaje.

¿Qué es un Divisor de Voltaje?

Un divisor de voltaje es una configuración simple de resistencias que se utiliza en electrónica para dividir la tensión de una fuente de energía entre los componentes de un circuito eléctrico. Este dispositivo convierte una alta tensión de entrada en una tensión más baja, que puede ser utilizada por otros componentes electrónicos.

Funcionamiento

El divisor de voltaje se basa en la ley de Ohm, que establece que la tensión en un circuito eléctrico es directamente proporcional a la corriente y a la resistencia. La fórmula básica de un divisor de voltaje es la siguiente:

$$V_s = V_e \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

Donde:

V_s es el voltaje de salida.

V_e es el voltaje de entrada

R_1 y R_2 son las resistencias del circuito.

En esta ecuación, el voltaje de salida depende del voltaje de entrada y de la relación entre las dos resistencias. Si se conoce el voltaje de entrada y los valores de las resistencias, se puede calcular el voltaje de salida. Ver figura 40.

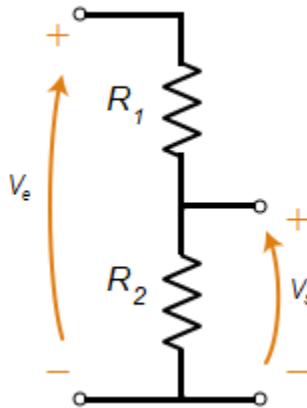


Figura 40 Divisor de voltaje.
Fuente: Creación personal.

Aplicaciones

Los divisores de voltaje tienen una amplia gama de aplicaciones en electrónica. Se utilizan en muchos dispositivos electrónicos para proporcionar diferentes niveles de voltaje a partir de una

única fuente de energía. Algunas de las aplicaciones más comunes de los divisores de voltaje incluyen:

1. Creación de niveles de voltaje de referencia en circuitos analógicos,
2. Control de volumen en amplificadores de audio,
3. Ajuste de la sensibilidad de los sensores.

Diseño

El diseño de un divisor de voltaje implica seleccionar los valores de las resistencias adecuados para obtener la tensión de salida deseada. La elección de las resistencias depende de la tensión de entrada y de la tensión de salida requerida. Es importante tener en cuenta que las resistencias deben ser capaces de manejar la corriente que pasa a través del circuito para evitar el sobrecalentamiento y posibles daños al circuito.

Limitaciones

A pesar de su utilidad, los divisores de voltaje tienen algunas limitaciones. Una de las principales es que solo funcionan correctamente cuando la carga del circuito es constante. Si la carga varía, la tensión de salida también variará, lo que puede causar problemas en algunos circuitos. Además, los divisores de voltaje pueden ser ineficientes cuando se utilizan para reducir una tensión de entrada muy alta a una tensión de salida muy baja.

Divisores de Voltaje en la Práctica

En la práctica, los divisores de voltaje son componentes esenciales en una variedad de circuitos. Desde la electrónica de consumo hasta los sistemas industriales, los divisores de voltaje desempeñan un papel crucial en la regulación y la distribución de la tensión. Es común encontrarlos en dispositivos como los controles de volumen de los equipos de sonido, en fuentes de alimentación y en sistemas de medición y prueba.

Conclusión

Los divisores de voltaje son herramientas esenciales en la electrónica que permiten convertir una alta tensión de entrada en una tensión más baja de salida. Son dispositivos sencillos basados en la ley de Ohm, y su diseño solo implica la correcta selección de resistencias. Aunque presentan algunas limitaciones, especialmente cuando la carga del circuito varía o se requiere una alta eficiencia, su versatilidad y amplia gama de aplicaciones hacen de los divisores de voltaje una pieza clave en el funcionamiento de muchos sistemas electrónicos. [9]

Ejemplo

Calcule el voltaje de salida V_s , del divisor de voltaje de la figura 40, si $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ y $V_e = 12 \text{ V}$.

Solución:

Aplicamos la fórmula para divisor de voltaje.

$$V_s = V_e \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] = 12 \text{ V} \left[\frac{3 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} \right] = 9 \text{ V}$$

3.7 Energía eléctrica y potencia

Ahora estudiaremos algunas relaciones entre la energía y la potencia en los circuitos eléctricos. La figura 41 representa un elemento de circuito con diferencia de potencial $V_a - V_b = V_{ab}$ entre sus terminales y la corriente I que pasa a través suyo en dirección de a hacia b . Este elemento puede ser un resistor, una batería u otro; los detalles no importan. Conforme la carga pasa por el elemento de circuito, el campo eléctrico realiza trabajo sobre la carga. En una fuente de *fem* la fuerza \vec{F}_n , efectúa trabajo adicional.

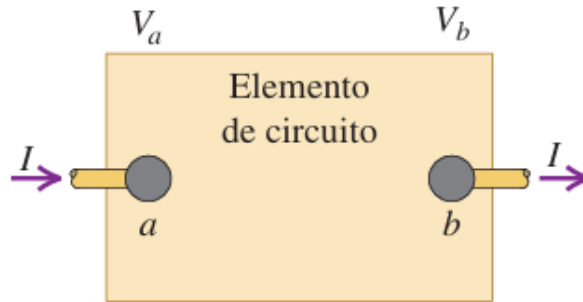


Figura 41 La potencia de alimentación al elemento de circuito entre a y b es $P = (V_a - V_b)I = V_{ab}I$.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Conforme una cantidad de carga q pasa a través del elemento de circuito, hay un cambio en la energía potencial igual a qV_{ab} . Por ejemplo, si $q > 0$ y $V_a - V_b = V_{ab}$ es positiva, la energía potencial disminuye a medida que la carga “cae” del potencial V_a al potencial más bajo V_b . Las cargas en movimiento no ganan energía cinética porque la tasa de flujo de carga (es decir, la corriente) que sale del elemento de circuito debe ser igual que la tasa de flujo de carga que entra a éste. En vez de ello, la cantidad qV_{ab} representa energía eléctrica transferida hacia el elemento de circuito. Esta situación ocurre en las bobinas de un tostador o un horno eléctrico, en donde la energía eléctrica se convierte en energía térmica.

Tal vez ocurra que el potencial en b sea mayor que en a . En este caso, V_{ab} es negativa, y hay una transferencia neta de energía hacia fuera del elemento de circuito. Después, el elemento actúa como fuente proveyendo energía eléctrica al circuito en que se encuentra. Ésta es la situación habitual para una batería, la cual convierte energía química en eléctrica y la entrega al circuito externo. Así, qV_{ab} puede denotar una cantidad de energía entregada a un elemento de circuito o una cantidad de energía que se extrae de ese elemento. 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

$$P = V_{ab} I$$

Representa la rapidez con la que se entrega energía a un elemento de circuito o se extrae de éste.

La unidad de V_{ab} es un volt, o un joule por coulomb, y la unidad de I es un ampere, o un coulomb por segundo. Entonces, la unidad de $P = V_{ab}I$ es un watt, como debe ser:

$$(1 \text{ J/C})(1 \text{ C/s}) = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$$

Veamos algunos casos especiales.

Potencia en una resistencia pura

Si el elemento de circuito de la figura 41 es un resistor, la diferencia de potencial es $V_a = IR$. La potencia eléctrica entregada al resistor por el circuito es

$$P = V_{ab}I = I^2R = \frac{V_{ab}^2}{R} \text{ potencia entregada a un resistor.}$$

En este caso, el potencial en a (donde entra la corriente al resistor) siempre es mayor que el que hay en b (donde sale la corriente). La corriente entra por la terminal de mayor potencial del dispositivo, y la ecuación anterior representa la rapidez de transferencia de energía potencial eléctrica hacia el elemento de circuito.

¿Qué le ocurre a esta energía? Las cargas en movimiento colisionan con los átomos en el resistor y transfieren algo de su energía a estos átomos, lo que incrementa la energía interna del material. O bien la temperatura del resistor aumenta o hay un flujo de calor hacia fuera de él, o ambas cosas. En cualquiera de estos casos se dice que la energía se disipa en el resistor a una tasa de I^2R . Cada resistor tiene una *potencia nominal*, que es la potencia máxima que el resistor es capaz de disipar sin que se sobrecaliente o se dañe. En las aplicaciones prácticas, la potencia nominal de un resistor a menudo es una característica tan importante como el valor de su resistencia. Por supuesto, algunos dispositivos, como los calentadores eléctricos, están diseñados para calentarse y transferir calor al ambiente. Pero si se excede la potencia nominal, incluso esa clase de aparatos pueden fundirse y estallar. [2]

3.7.1 Ley de Joule

Para poder comprender el efecto Joule debemos primero explicar brevemente el concepto de calor, el cual es el desprendimiento de energía por parte de un sistema como causa del movimiento, a escala microscópica, de las partículas que lo componen.

Un ejemplo muy claro se da al calentar agua: lo que se produce es un aumento de la energía del sistema, algo que, a nivel molecular, se traduce como un mayor movimiento de las partículas que lo componen. La energía absorbida, más tarde, se desprende nuevamente al exterior en forma de calor, siempre que el entorno que rodee a dicho sistema cuente con unos niveles energéticos inferiores, es decir, que la temperatura fuera del recipiente sea más baja.

La energía se desprende debido a que los sistemas tienden, por naturaleza, a buscar una situación de reposo o calma (que el movimiento de sus partículas sea el menor posible). Por ello, cuando este estado de relativa calma se altera, los sistemas intercambian energía con los que les rodean para tratar de aproximarse lo máximo posible a dicho estado. En el caso del recipiente de agua, el calor emitido al exterior permite enfriar al sistema y reducir sus niveles energéticos. Ese intercambio de energía es a lo que llamamos calor.

Para el caso de los sistemas eléctricos, al circular una corriente eléctrica a través de un conductor, el movimiento de los electrones dentro del mismo produce choques con los átomos del conductor cuando adquieren velocidad constante, lo que hace que parte de la energía cinética de los electrones se convierta en calor, con un consiguiente aumento en la temperatura del conductor. Mientras más corriente fluya, mayor será el aumento de la energía térmica del conductor y por consiguiente, mayor será el calor liberado. A este fenómeno se le conoce como efecto Joule.

“La cantidad de calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente”.

¿Por qué se llama efecto Joule?

El nombre de efecto Joule lo recibe del físico británico James Prescott Joule, quien es reconocido como uno de los más notables físicos de su época, sobre todo por su investigación en electricidad y termodinámica. En el transcurso de sus investigaciones sobre el calor desprendido en un circuito eléctrico, pudo establecer que la cantidad de calor producida en un conductor por el paso de una corriente eléctrica, dada en una unidad de tiempo, es proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de corriente.

El calor producido por la corriente eléctrica que fluye a través de un conductor, entonces, es una medida del trabajo hecho por la corriente venciendo la resistencia del conductor; la energía requerida para este trabajo es suministrada por una fuente, mientras más calor produzca mayor será el trabajo hecho por la corriente y, por consiguiente, mayor será la energía suministrada por la fuente; entonces, determinando cuánto calor se produce, se puede conocer cuánta energía suministra la fuente y viceversa.

La fórmula de Joule

El calor generado por este efecto se puede calcular mediante la **Ley de Joule**, que dice:

“La cantidad de calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente”.

Expresado como fórmula tenemos:

$$Q = I^2 R t$$

Donde:

Q = Cantidad de calor, en Joules

I = Intensidad de la corriente, en Amperes

R = Resistencia eléctrica, en Ohms

t = Tiempo de duración que fluye la corriente, en segundos

Esto equivale a la ecuación para la energía eléctrica, ya que la causa del efecto Joule es precisamente una pérdida de energía en forma de calor.

¿Dónde se aplica el efecto Joule?

Este fenómeno se presenta entonces en cualquier conductor donde circula la corriente, por lo que es de esperarse que en artefactos como motores o sistemas eléctricos esto presente un problema. En los hogares se encuentra una gran cantidad de ejemplos: planchas de ropa y cabello, hervidores, hornos, calentadores de ambiente y de agua, secadores, rizadores, tostadores de pan, entre otros.

En la industria, el efecto Joule permite el funcionamiento de aparatos y equipos, como de soldadura, hornos eléctricos para la fundición y metalurgia y soldadores de punto. Este último, muy utilizado en la industria automotriz y en la chapistería, reemplaza con ventaja al sistema de remachado.

Como ves, el fenómeno del calor desprendido fue estudiado de forma minuciosa para lograr explicarlo y poder manejarlo de forma correcta en diversas aplicaciones. [10]

3.7.2 Potencia eléctrica

Hemos visto que la carga eléctrica gana energía en una fuente generadora de *fem* y pierde energía cuando pasa a través de una resistencia externa. Dentro de la fuente de *fem*, el trabajo es realizado por la fuente elevando la energía potencial de la carga. Cuando la carga pasa a través del circuito externo, el trabajo es realizado por la carga sobre los componentes del circuito. En el caso de un resistor puro, la energía se disipa en forma de calor. Si se conecta un motor al circuito, la pérdida de energía se divide entre el calor y el trabajo útil realizado.

En cualquier caso, la energía ganada en la fuente de *fem* debe igualar la energía perdida en el circuito completo. Examinemos con más detalle el trabajo que se realiza dentro de la fuente de *fem*. Por definición, se desarrolla **un joule** de trabajo por cada coulomb de carga que se mueve a través de una diferencia de potencial de **un volt**. Por tanto,

$$\text{Trabajo} = Vq$$

donde q es la cantidad de carga transferida durante un tiempo t . Pero $q = It$, así que podemos expresar

$$\text{Trabajo} = VIt$$

donde I es la corriente en coulombs por segundo. Este trabajo representa la energía ganada debido a una carga que pasa a través de la fuente de *fem* durante el tiempo t . Una cantidad equivalente de energía se disipará en forma de calor a medida que la carga se mueve a través de una resistencia externa.

La rapidez con la cual se disipa el calor en un circuito eléctrico se conoce como potencia disipada. Cuando la carga fluye en forma continua a través de un circuito, esta potencia disipada está dada por

$$P = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}} = \frac{VIt}{t} = VI$$

Cuando V está expresada en *volts* e I se expresa en *amperes*, la potencia disipada se mide en *watts*. Se demuestra que el producto del voltaje por la corriente da una unidad de potencia en la siguiente forma:

$$(V)(A) = \frac{J}{C} \frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W$$

La ecuación de Potencia disipada se puede expresar en de otras maneras usando la Ley de Ohm ($V = IR$). Al sustituir V se puede escribir

$$P = VI = I^2R$$

La sustitución de I en la ecuación nos da otra expresión:

$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

La relación expresada se utiliza con tanta frecuencia en trabajos de electricidad, que la pérdida de calor en el alambrado eléctrico se conoce a menudo como una pérdida “ I -cuadrada- R ?”. [1]

3.8 Elección e inicio de Proyecto

UNIDAD 4 Campo Magnético

Competencias

Específica:

Conoce los conceptos, efectos y aplicaciones del campo magnético, así como las leyes que lo rigen.

Genéricas:

- Conocimientos básicos de la carrera
- Habilidades interpersonales
- Capacidad de aplicar conocimientos en la práctica

4.1 Conceptos: Magnetismo, campo magnético y flujo magnético

Magnetismo

Los fenómenos magnéticos fueron observados por primera vez al menos hace 2500 años, con fragmentos de mineral de hierro magnetizado cerca de la antigua ciudad de Magnesia (hoy Manisa, en Turquía occidental). Esos trozos eran ejemplos de lo que ahora llamamos imanes permanentes; es probable que en la puerta del refrigerador de su hogar haya varios imanes permanentes. Vimos que los imanes permanentes ejercían fuerza uno sobre otro y sobre trozos de hierro que no estaban magnetizados. Se descubrió que cuando una varilla de hierro entraba en contacto con un imán natural, aquella también se magnetizaba, y si la varilla flotaba en agua

o se suspendía de un hilo por su parte central, tendía a alinearse con la dirección norte-sur. La aguja de una brújula ordinaria no es más que un trozo de hierro magnetizado.

Antes de que se entendiera la relación que había entre las interacciones magnéticas y las cargas en movimiento, las interacciones de los imanes permanentes y las agujas de las brújulas se describían en términos de *polos magnéticos*. Si un imán permanente en forma de barra, o *imán de barra*, tiene libertad para girar, uno de sus extremos señalará al norte. Este extremo se llama *polo norte* o *polo N*; el otro extremo es el *polo sur* o *polo S*. Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se rechazan. Ver figura 42.

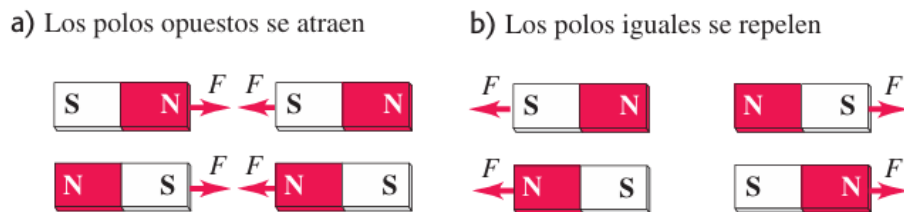


Figura 42 a) Dos imanes de barra se atraen cuando sus polos opuestos (N y S, o S y N) están cerca uno del otro. b) Los imanes de barra se repelen cuando sus polos iguales (N y N, o S y S) se aproximan entre sí.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Un objeto que contenga hierro, pero no esté magnetizado (es decir, que no tenga tendencia a señalar al norte o al sur) será atraído por cualquiera de los polos de un imán permanente 43. Ésta es la atracción que actúa entre un imán y la puerta de acero no magnetizada de un refrigerador. Por analogía con las interacciones eléctricas, describimos las interacciones en las figuras 42 y 43 como un imán de barra que genera un *campo magnético* en el espacio que la rodea y un segundo cuerpo responde a dicho campo. La aguja de una brújula tiende a alinearse con el campo magnético en la posición de la aguja.

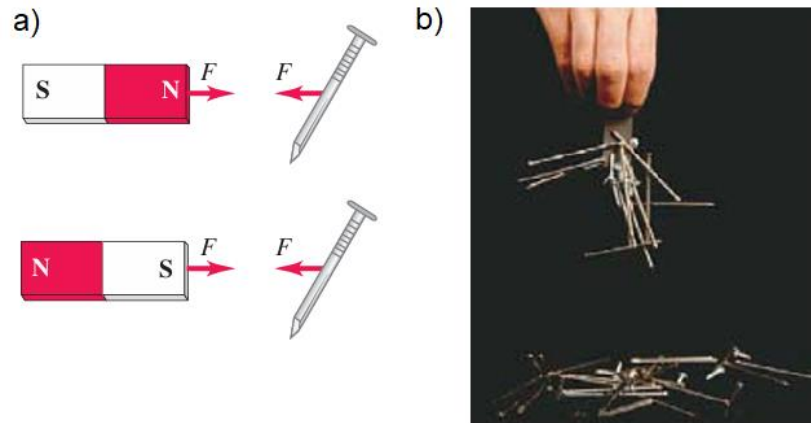


Figura 43 a) Cualquiera de los polos de un imán de barra atrae a un objeto no magnetizado que contenga hierro, como un clavo. b) Ejemplo de este efecto en la vida real.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

La Tierra misma es un imán. Su polo norte geográfico está cerca del polo sur magnético, lo cual es la razón por la que el polo norte de la aguja de una brújula señala al norte terrestre. El eje magnético de nuestro planeta no es del todo paralelo a su eje geográfico (el eje de rotación), así que la lectura de una brújula se desvía un poco del norte geográfico. Tal desviación, que varía con la ubicación, se llama declinación magnética o variación magnética. Asimismo, el campo magnético no es horizontal en la mayoría de los puntos de la superficie terrestre; su ángulo hacia arriba o hacia abajo se denomina inclinación magnética. En los polos magnéticos, el campo magnético es vertical. [2]

Campo Magnético

Todo imán está rodeado por un espacio, en el cual se manifiestan sus efectos magnéticos. Dichas regiones se llaman campos magnéticos. Así como las líneas del campo eléctrico fueron útiles para describir los campos eléctricos, las líneas de campo magnético, llamadas líneas de flujo, son muy útiles para visualizar los campos magnéticos. La dirección de una línea de flujo en cualquier punto tiene la misma dirección de la fuerza magnética que actuaría sobre un polo norte imaginario aislado y colocado en ese punto (véase la figura 44a). De acuerdo con esto, las líneas de flujo magnético salen del polo norte de un imán y entran en el polo sur.

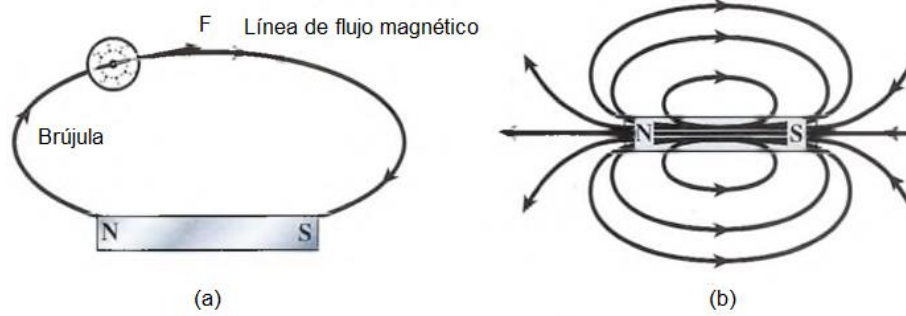


Figura 44 (a) Las líneas de flujo magnético están en la dirección de la fuerza que se ejerce sobre un polo norte independiente, (b) Las líneas de flujo cercanas a una barra imantada.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

A diferencia de las líneas de campo eléctrico, las líneas de flujo magnético no tienen puntos iniciales o finales; forman espiras continuas que pasan a través de la barra metálica, como muestra la figura 44b. Las líneas de flujo en la región comprendida entre dos polos iguales o diferentes se ilustran en la figura 45.

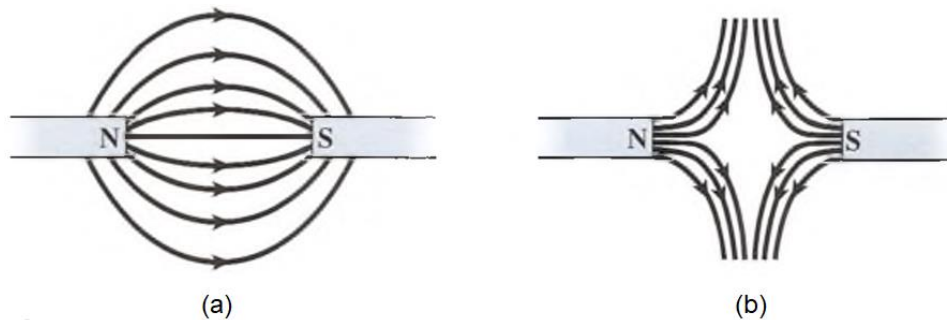


Figura 45 (a) Líneas de flujo magnético entre dos polos magnéticos diferentes, (b) Líneas de flujo magnético entre dos polos iguales.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Flujo Magnético

El flujo magnético (representado por ϕ), es una medida de la cantidad de magnetismo, y se calcula a partir del campo magnético, la superficie sobre la cual actúa y el ángulo de incidencia formado entre las líneas de campo magnético y los diferentes elementos de dicha superficie.

Las líneas de campo eléctrico se dibujan de modo que su espaciamiento en cualquier punto permita determinar la fuerza del campo eléctrico en ese punto (consulte la figura 46). El número de líneas ΔN dibujadas a través de la unidad de área ΔA es directamente proporcional a la intensidad del campo eléctrico E

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} = \epsilon E$$

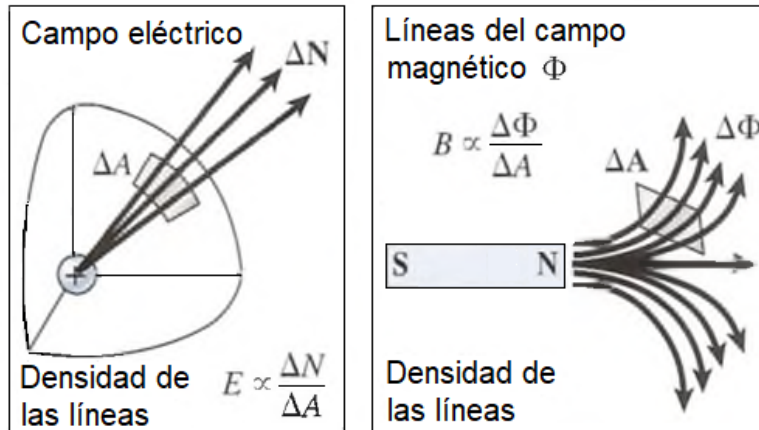


Figura 46 De igual forma en que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de líneas del campo eléctrico, el campo magnético es proporcional a la densidad de las líneas de flujo del campo magnético.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

La constante de proporcionalidad ϵ , que determina el número de líneas dibujadas, es la permitividad del medio a través del cual pasan las líneas.

Se puede realizar una descripción análoga de un campo magnético considerando al flujo magnético Φ que pasa a través de una unidad de área perpendicular A . A esta razón B se le llama *densidad de flujo magnético*.

La densidad de flujo magnético en una región de un campo magnético es el número de líneas de flujo que pasan a través de una unidad de área perpendicular en esa región.

$$B = \frac{\phi \text{ (flujo magnético)}}{A \text{ (área)}}$$

La unidad del flujo magnético en el *SI* es el *weber* (*Wb*). La unidad de densidad de flujo debe ser entonces *webers por metro cuadrado*, que se redefine como *tesla* (*T*). Una antigua unidad que todavía se usa hoy es el *Gauss* (*G*). En resumen [1]

$$1 T = 1 Wb/m^2 = 10^4 G$$

Ejemplo

Una espira rectangular de 10 *cm* de ancho y 20 *cm* de largo forma un ángulo de 30° respecto al flujo magnético mostrado en la figura 47. Si la densidad de flujo es 0.3 *T*, calcule el flujo magnético ϕ que penetra la espira.

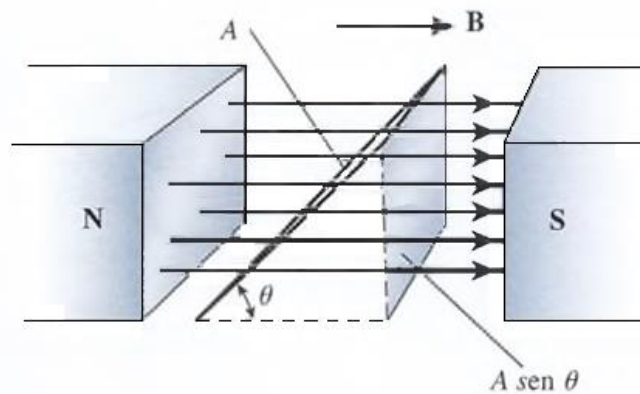


Figura 47 Cálculo del flujo magnético a través de una espira rectangular.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Plan: El área efectiva penetrada por el flujo es la componente del área que es perpendicular al flujo. Si θ se elige como el ángulo que forma el plano de la espira con el campo B , esta componente es simplemente $A \text{ sen } \theta$. La definición del campo B como densidad de flujo se usará para calcular el flujo ϕ que penetra en esa componente de área.

Solución: El área de la espira rectangular es

$$A = (0.10 \text{ m})(0.20 \text{ m}) = 0.020 \text{ m}^2$$

De la ecuación $B = \phi/A$, la magnitud del campo B se define como el flujo por unidad de área perpendicular al campo. Por tanto, escribimos

$$B = \frac{\phi}{A \text{ sen } \theta} \quad \text{o} \quad \phi = BA \text{ sen } \theta$$

El flujo magnético en *webers* se determina por sustitución.

$$\phi = (0.3 \text{ T})(0.02 \text{ m}^2) \text{ sen } 30^\circ = 3 \times 10^{-3} \text{ Wb} = 3 \text{ mWb}$$

4.2 Materiales magnéticos y sus propiedades. Histéresis

En el análisis de cómo es que las corrientes generan campos magnéticos, se ha supuesto que los conductores están rodeados por vacío. Pero las bobinas de transformadores, motores, generadores y electroimanes casi siempre tienen núcleos de hierro para incrementar el campo magnético y confinarlo a las regiones deseadas. Los imanes permanentes, las cintas magnéticas de grabación y los discos de computadora dependen directamente de las propiedades magnéticas de los materiales; cuando se guarda información en un disco de computadora, en realidad se establece una configuración de imanes permanentes microscópicos en el disco. Así que conviene examinar algunos aspectos de las propiedades magnéticas de los materiales. Después de describir los orígenes atómicos de las propiedades magnéticas, estudiaremos las

tres grandes clases de comportamiento magnético que ocurren en los materiales: paramagnetismo, diamagnetismo y ferromagnetismo.

Paramagnetismo

En un átomo, la mayoría de los distintos momentos magnéticos orbitales y de espín de los electrones suman cero. Sin embargo, en ciertos casos el átomo tiene un momento magnético neto que es del orden de μB . Cuando un material así se coloca en un campo magnético, éste ejerce un par de torsión sobre cada momento magnético, según lo la ecuación $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$. Estos pares de torsión tienden a alinear los momentos magnéticos con el campo, la posición de mínima energía potencial. En esta posición, las direcciones de las espiras de corriente son de tal naturaleza que se *suman* al campo magnético aplicado externamente.

El campo \vec{B} producido por una espira de corriente es proporcional al momento dipolar magnético de la espira. Del mismo modo, el campo adicional \vec{B} producido por espiras de corriente electrónicas microscópicas es proporcional al momento magnético total $\vec{\mu}_{TOTAL}$ por unidad de volumen V en el material. Esta cantidad vectorial recibe el nombre de **magnetización** del material, y se denota por

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{TOTAL}}{V}$$

El campo magnético adicional debido a la magnetización del material resulta ser igual simplemente $\mu_0 \vec{M}$ a donde μ_0 es la misma constante que aparece en la Ley de Biot y Savart y la Ley de Ampère. Cuando un material así rodea por completo un conductor portador de corriente, el campo magnético total \vec{B} en el material es

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

donde \vec{B}_0 es el campo generado por la corriente en el conductor.

Para comprobar que las unidades son congruentes, advierta que la magnetización \vec{M} es momento magnético por unidad de volumen. Las unidades de momento magnético son corriente por área $A \cdot m^2$, de magnetización por lo que las unidades de magnetización son

$$(A \cdot m^2)/m^3 = A/m$$

Las unidades de la constante μ_0 son $T \cdot m/A$. Así que las unidades de $\mu_0 \vec{M}$ son las mismas que las de \vec{B} : $(T \cdot m/A)(A/m) = T$

Se dice que un material que tenga el comportamiento que se acaba de describir es **paramagnético**. El resultado es que el campo magnético en cualquier punto de un material así es mayor en un factor adimensional K_m , llamado **permeabilidad relativa** del material, de lo que sería si ese material se remplazara por un vacío. El valor de K_m es diferente para distintos materiales; para sólidos y líquidos paramagnéticos comunes a temperatura ambiente, es común que K_m varíe entre 1.00001 y 1.003.

Todas las ecuaciones que relacionan los campos magnéticos con sus fuentes se adaptan a la situación en la que el conductor que transporta corriente está incrustado en un material paramagnético. Todo lo que se necesita hacer es sustituir μ_0 por $K_m \mu_0$. Este producto por lo general se denota como μ y se llama **permeabilidad** del material:

$$\mu = K_m \mu_0$$

Diamagnetismo

En ciertos materiales, el momento magnético total de todas las espiras atómicas de corriente es igual a cero cuando no hay un campo magnético. Pero incluso estos materiales tienen efectos magnéticos porque un campo externo altera los movimientos de los electrones dentro de los átomos, lo que genera espiras de corriente adicionales y dipolos magnéticos inducidos comparables a los dipolos *eléctricos* inducidos. En este caso, la dirección del campo adicional causado por estas espiras de corriente siempre es *opuesta* a la dirección del campo externo. (Este comportamiento se explica mediante la Ley de Faraday de la inducción. Una corriente inducida siempre tiende a cancelar el cambio de campo que la provocó.)

Se dice que tales materiales son **diamagnéticos**. Siempre tienen susceptibilidad negativa, como se aprecia en la tabla 8, y permeabilidad relativa K_m ligeramente *menor* que la unidad, comúnmente del orden de 0.99990 a 0.99999 para sólidos y líquidos. Las susceptibilidades diamagnéticas están muy cerca de ser independientes de la temperatura.

Material	$\chi_m = K_m - 1$ ($\times 10^{-5}$)
Paramagnéticos	
Alumbre de hierro y amonio	66
Uranio	40
Platino	26
Aluminio	2.2
Sodio	0.72
Oxígeno gaseoso	0.19
Diamagnéticos	
Bismuto	-16.6
Mercurio	-2.9
Plata	-2.6
Carbono (diamante)	-2.1
Plomo	-1.8
Cloruro de sodio	-1.4
Cobre	-1.0

Tabla 8 Susceptibilidades magnéticas de materiales paramagnéticos y diamagnéticos a $T = 20^\circ\text{C}$
Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Ferromagnetismo

Existe una tercera clase de materiales, llamados **ferromagnéticos**, que incluyen al hierro, níquel, cobalto y muchas aleaciones que contienen estos elementos. En esos materiales, las interacciones fuertes entre los momentos magnéticos atómicos los incitan a alinearse paralelamente entre sí en regiones llamadas *dominios magnéticos*, aun cuando no esté presente un campo externo. La figura 48 muestra un ejemplo de estructura de dominio magnético.

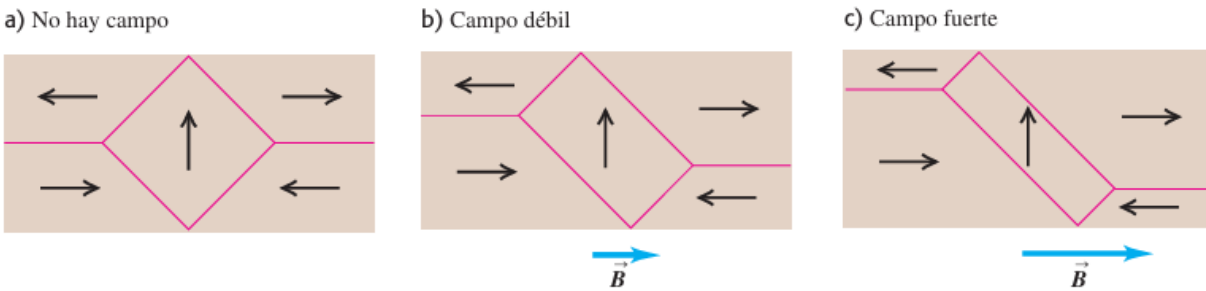


Figura 48 De una fotografía con aumento, las flechas señalan las direcciones de magnetización en los dominios de un solo cristal de níquel. Los dominios que están magnetizados en la dirección de un campo magnético aplicado crecen.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Dentro de cada dominio, casi todos los momentos magnéticos atómicos son paralelos. Cuando no hay un campo externo aplicado, las magnetizaciones de los dominios están orientadas al azar. Pero cuando está presente un campo \vec{B}_o (generado por corrientes externas), los dominios tienden a orientarse paralelamente al campo. Las fronteras del dominio también se desplazan; los dominios magnetizados en dirección del campo crecen, y aquellos que lo están en otras direcciones se reducen. Como el momento magnético total de un dominio puede ser de muchos miles de magnetones de Bohr, los pares de torsión que tienden a alinear los dominios con un campo externo son mucho más intensos que aquellos que se presentan en los materiales paramagnéticos. La permeabilidad relativa K_m es mucho mayor que la unidad, comúnmente del orden de 1,000 a 100,000. Como resultado, un objeto hecho de un material ferromagnético como el hierro es magnetizado fuertemente por el campo de un imán permanente y es atraído por éste. Un material paramagnético como el aluminio también es atraído por un imán permanente, pero las K_m de los materiales paramagnéticos son tan pequeñas en comparación con las K_m de los materiales ferromagnéticos, que la atracción es muy débil. Por eso, un imán puede levantar clavos de hierro, pero no latas de aluminio.

A medida que se incrementa el campo externo, se alcanza en algún momento un punto en que casi todos los momentos magnéticos en el material ferromagnético están alineados en forma paralela con el campo externo. Esta condición se llama magnetización de saturación; una vez que ésta se alcanza, un mayor incremento del campo externo ya no ocasiona un aumento en la magnetización ni en el campo adicional causado por la magnetización.

La figura 49 muestra una “curva de magnetización”, una gráfica de la magnetización M como función del campo magnético externo B_0 , para el hierro dulce. Una descripción alternativa de este comportamiento es que K_m no es constante, sino que disminuye conforme aumenta B_0 . (Los materiales paramagnéticos también presentan saturación en campos suficientemente intensos. Pero los campos magnéticos que se requieren son tan grandes que la desviación con respecto a una relación lineal entre M y B_0 en estos materiales sólo se observa a temperaturas muy bajas, de 1 K o cercanas.)

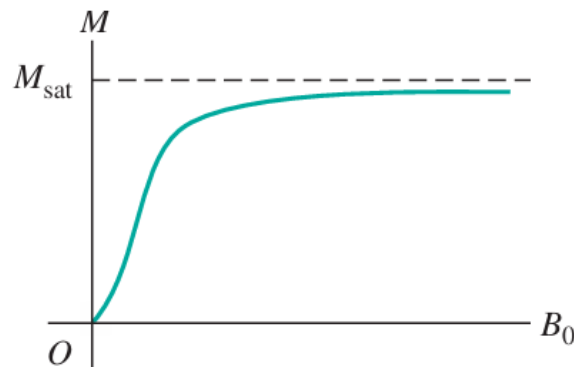


Figura 49 Curva de magnetización para un material ferromagnético. La magnetización M se aproxima a su valor de saturación M_{sat} conforme el campo magnético B_0 (generado por corrientes externas) aumenta.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Histéresis

Para muchos materiales ferromagnéticos, la relación entre magnetización y el campo magnético externo es diferente cuando el campo externo aumenta que cuando disminuye. La figura 50a muestra esta relación para un material de este tipo. Cuando el material se magnetiza hasta la saturación y luego el campo externo se reduce a cero, permanece cierta magnetización. Este comportamiento es característico de los imanes permanentes, que retienen la mayor parte de su magnetización de saturación cuando se retira el campo magnético. Para reducir la magnetización a cero se requiere un campo magnético en la dirección inversa.

Este comportamiento se llama histéresis, y las curvas de la figura 50 se denominan curvas o ciclos de histéresis. La magnetización y desmagnetización de un material que tiene histéresis implica la disipación de energía, por lo que la temperatura del material aumenta durante este proceso.

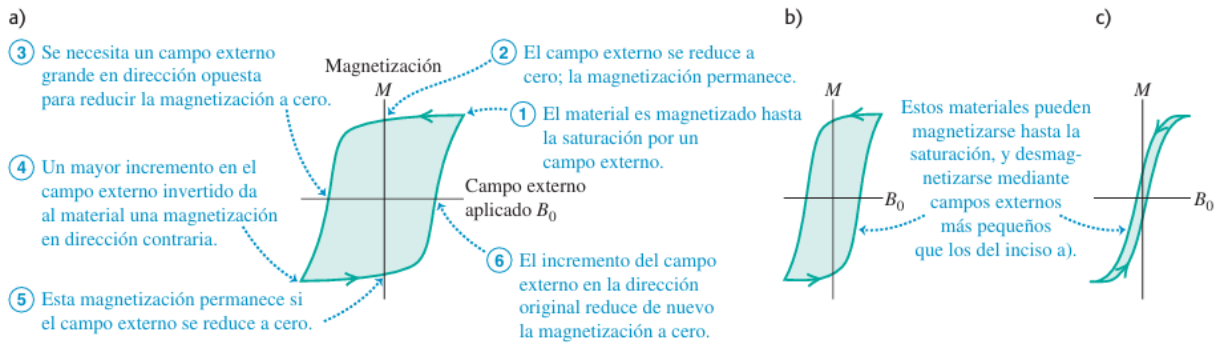


Figura 50 Ciclos de histéresis. Los materiales en los incisos a) y b) permanecen muy magnetizados cuando B_0 se reduce a cero. Como el material de a) también es difícil de desmagnetizar, sería adecuado para imanes permanentes. Puesto que el material de b) se magnetiza y desmagnetiza con más facilidad, podría usarse como material para memorias de computadoras. El material de c) sería útil para los transformadores y otros dispositivos de corriente alterna en los que sería óptima una histéresis de cero.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Los materiales ferromagnéticos se utilizan ampliamente en electroimanes, núcleos de transformadores y motores y generadores, en los que es deseable tener un campo magnético tan grande como sea posible para una corriente determinada. Puesto que la histéresis disipa energía, los materiales que se utilizan en estas aplicaciones por lo general deben tener un ciclo de histéresis tan estrecho como sea posible. El hierro dulce se utiliza con frecuencia, ya que tiene alta permeabilidad sin histéresis apreciable. Para imanes permanentes, generalmente resulta deseable un ciclo de histéresis amplio, con un campo de magnetización cero extenso, y un campo inverso extenso que se necesita para desmagnetizar. Es común el uso de muchas clases de acero y de numerosas aleaciones, como el Alnico, en la fabricación de imanes permanentes. El campo magnético residual en un material de este tipo, después de haberse magnetizado hasta cerca de la saturación, por lo común es del orden de $1 T$, lo que corresponde a una magnetización residual $M = B/\mu_0$ de alrededor de $800,000 A/m$. [2]

4.3 Generación de campos magnéticos. Ley de Biot–Savart

Campo magnético de una carga en movimiento

Comenzaremos con lo fundamental: el campo magnético de una sola carga puntual q que se mueve con velocidad constante \vec{v} . En las aplicaciones prácticas, como en un solenoide, los campos magnéticos son producto de un número enorme de partículas con carga que se desplazan en una corriente. Pero una vez comprendida la forma de calcular el campo debido a una sola carga puntual, basta un pequeño paso para calcular el campo producido por un alambre o un conjunto de alambres que transportan corriente.

Al igual que en el caso de los campos eléctricos, llamaremos *punto de fuente* a la ubicación de la carga en movimiento en un instante dado, y *punto de campo* al punto P donde pretendemos calcular el campo. Un punto de campo situado a una distancia r de una carga puntual q , la magnitud del *campo eléctrico* \vec{E} generado por la carga es proporcional a la magnitud de la carga q y a $1/r^2$, y la dirección de \vec{E} (para q positiva) es a lo largo de la línea que une al punto de fuente con el punto de campo. La relación correspondiente para el *campo magnético* \vec{B} de una carga puntual q que se mueve con velocidad constante tiene algunas similitudes y ciertas diferencias interesantes.

Los experimentos demuestran que la magnitud de \vec{B} también es proporcional a q y a $1/r^2$. Pero la *dirección* de \vec{B} no es a lo largo de la línea que va del punto de fuente al punto de campo. En vez de ello, \vec{B} es perpendicular al plano que contiene esta línea y al vector velocidad, \vec{v} , de la partícula, como se ilustra en la figura 51. Además, la *magnitud* B del campo también es proporcional a la rapidez v de la partícula y al seno del ángulo ϕ . Así, la magnitud del campo magnético en el punto P está dada por

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

donde $\frac{\mu_0}{4\pi}$ es una constante de proporcionalidad (el símbolo μ_0 se lee “mu subíndice cero”).

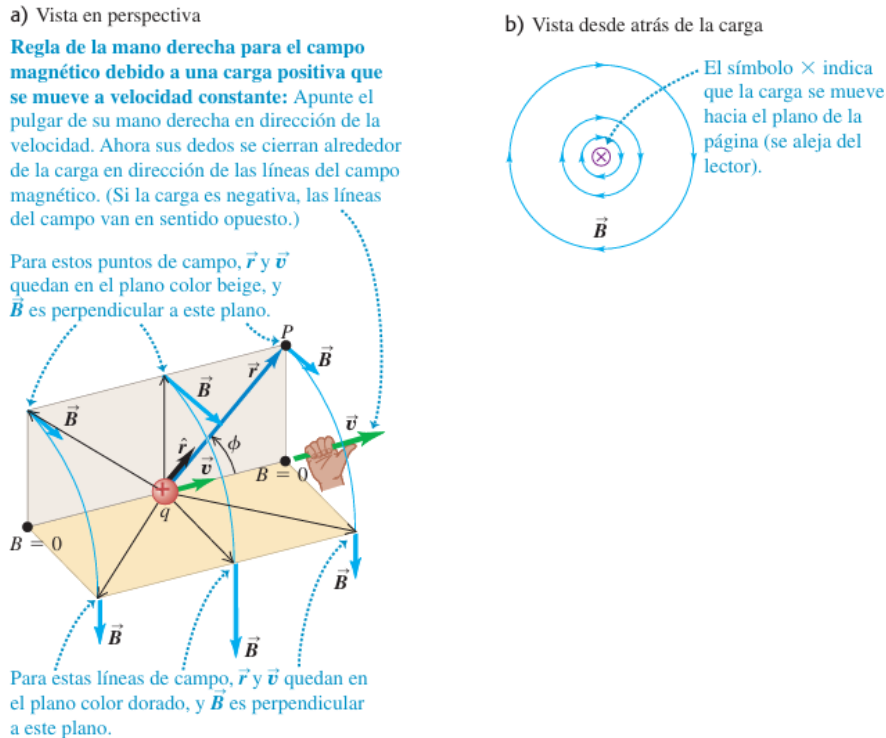


Figura 51 a) Vectores de campo magnético debidos a una carga puntual positiva en movimiento, q . En cada punto, es perpendicular al plano de \vec{r} y \vec{v} , y su magnitud es proporcional al seno del ángulo entre ellos. b) Las líneas de campo magnético en un plano contienen a la carga positiva en movimiento.
 Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Campo magnético de un elemento de corriente

Igual que para el campo eléctrico, hay un principio de superposición de campos magnéticos: El campo magnético total generado por varias cargas en movimiento es la suma vectorial de los campos generados por las cargas individuales. Este principio se puede utilizar para encontrar el campo magnético producido por una corriente en un conductor. Comenzamos con el cálculo del campo magnético ocasionado por un segmento corto de un conductor que transporta corriente, como se ilustra en la figura 52a. El volumen del segmento es $A dl$, donde A es el área de la sección transversal del conductor. Si hay n partículas con carga en movimiento por unidad de volumen, cada una con una carga q , la carga total dQ que se mueve en el segmento es

$$dQ = nqA dl$$

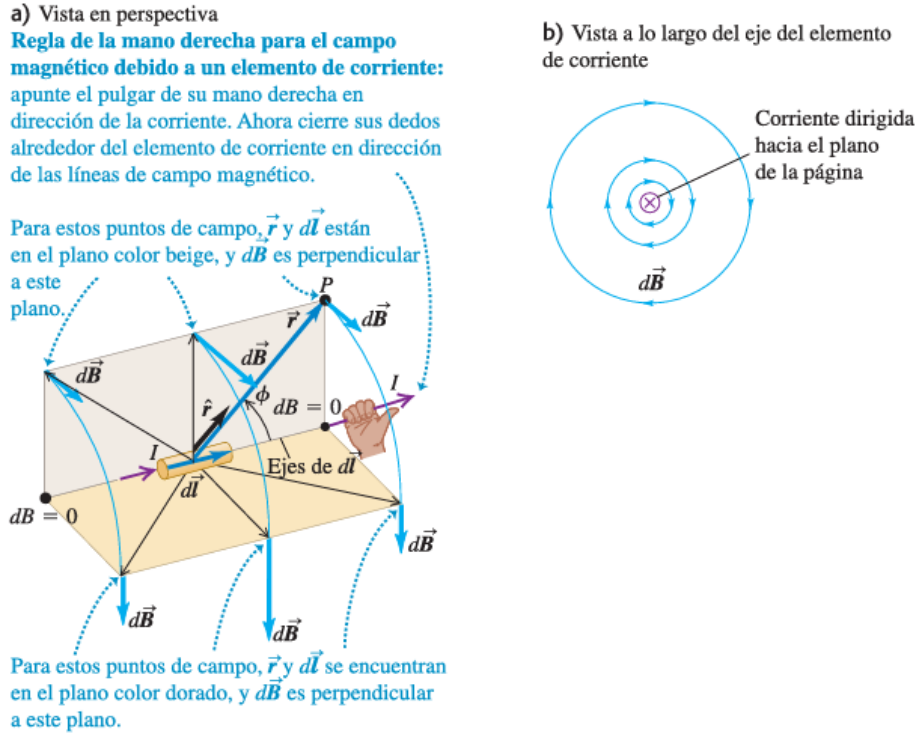


Figura 52 a) Vectores del campo magnético debido a un elemento de corriente b) Líneas de campo magnético en un plano que contiene el elemento de corriente Compare esta figura con la 28.1 para el campo de una carga puntual en movimiento.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Las cargas en movimiento en este segmento son equivalentes a una sola carga dQ que viaja con una velocidad igual a la velocidad de deriva (Los campos magnéticos debidos a los movimientos al azar de las cargas, en promedio, se cancelarán en cada punto.) De acuerdo con la ecuación

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

la magnitud del campo $d\vec{B}$ resultante en cualquier punto P es

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|dQ| v_d \text{ sen } \phi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n|q| v_d A dl \text{ sen } \phi}{r^2}$$

Pero, sabemos que $n|q| v_d A$ es igual a la corriente I en el elemento. Por lo tanto,

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

Elemento de corriente: Campo vectorial magnético

En forma vectorial, usando el vector unitario \hat{r} , se tiene

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

donde \vec{dl} es un vector con longitud dl , en la misma dirección que la corriente en el conductor.

Ley de Biot y Savart

Las últimas 2 ecuaciones constituyen la **Ley de Biot y Savart**. Esta ley se utiliza para encontrar el campo magnético total \vec{B} debido a la corriente en un circuito completo en cualquier punto en el espacio. Para hacerlo, se integra la ecuación

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

con respecto a todos los segmentos $d\vec{l}$ que conduzcan corriente; en forma simbólica,

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

Campo magnético de un conductor que transporta corriente

Una aplicación importante de la ley de Biot y Savart es la obtención del campo magnético producido por un conductor recto que conduce corriente. Este resultado es útil debido a que prácticamente en todos los aparatos eléctricos y electrónicos se encuentran alambres conductores rectos. La figura 53 muestra un conductor con longitud $2a$ que conduce una corriente I . Encontraremos \vec{B} en un punto a una distancia x del conductor, sobre su bisectriz perpendicular.

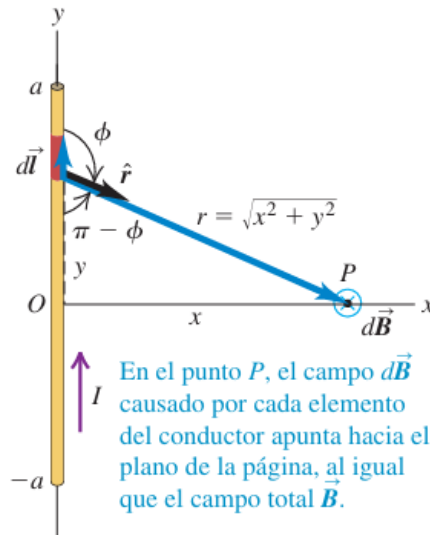


Figura 53 Campo magnético producido por un conductor recto portador de corriente de longitud $2a$.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Primero usamos la Ley de Biot y Savart, para encontrar el campo $d\vec{B}$ generado por el elemento de conductor con la longitud $dl = dy$ que se ilustra en la figura 54. De acuerdo con la figura, $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ y $\text{sen } \phi = \text{sen}(\pi - \phi) = x/\sqrt{(x^2 + y^2)}$. La regla de la mano derecha para el producto vectorial $d\vec{l} \times \hat{r}$ indica que la *dirección* de $d\vec{B}$ es hacia el plano de la figura, perpendicular al plano; además, las direcciones de los $d\vec{B}$'s generados por todos los elementos del conductor son las mismas. Así, para integrar la ecuación, simplemente se suman las magnitudes de los elementos $d\vec{B}$'s, una simplificación significativa.

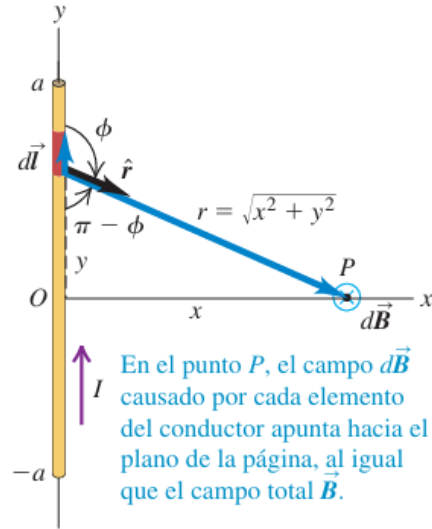


Figura 54 Campo magnético producido por un conductor recto portador de corriente de longitud $2a$.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39) (10th ed.)*. Pearson.

Al reunir los elementos, se encuentra que la magnitud total del campo \hat{B} es

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

Integrando por sustitución trigonométrica y considerando que la longitud $2a$ del conductor es muy grande en comparación con su distancia x desde el punto P , se convierte en

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

La situación física tiene simetría axial con respecto del eje y . Por lo tanto, \hat{B} debe tener la misma *magnitud* en todos los puntos de un círculo con centro en el conductor y que yace en un plano perpendicular a él, y la dirección de \hat{B} debe ser tangente a todo ese círculo. Así, en todos los puntos de un círculo de radio r alrededor del conductor, la magnitud B es [2]

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{cerca de un conductor largo y recto portador de corriente})$$

4.4 Fuerza magnética sobre una carga

Investiguemos los efectos de un campo magnético observando la fuerza magnética ejercida sobre una carga que pasa a través del campo. Para estudiar estos efectos, es útil imaginar un tubo de iones positivos como el de la figura 55. Dicho tubo nos permite inyectar un ion positivo de carga y velocidad constantes en un campo de densidad de flujo magnético B . Orientando el tubo en varias direcciones, podemos observar la fuerza ejercida sobre la carga en movimiento. La observación más importante es que dicha carga experimenta una fuerza que es perpendicular tanto a la densidad de flujo magnético B , como a la velocidad v de la carga en movimiento. Observe que cuando el flujo magnético se dirige de izquierda a derecha y la carga se mueve hacia donde está el lector, la carga se desvía hacia arriba. Si se invierte la polaridad de los imanes, se provoca que la carga se desvíe hacia abajo.

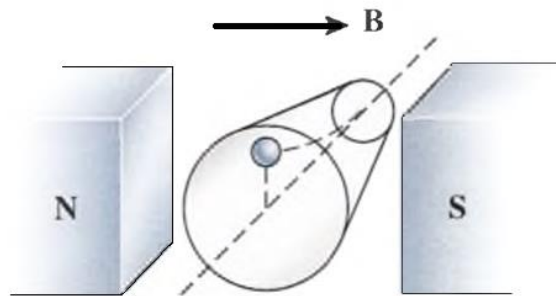


Figura 55 La fuerza magnética F sobre una carga en movimiento es perpendicular tanto a la densidad de flujo B como a la velocidad de carga v .

Fuente: Tiplers, P. (2000). Física - Conceptos y Aplicación 5b Edición. McGraw-Hill Companies.*

La dirección de la fuerza magnética F sobre una carga positiva en movimiento con una velocidad v en un campo de densidad de flujo B , puede considerarse mediante la regla del tornillo de rosca derecha (véase la figura 56)

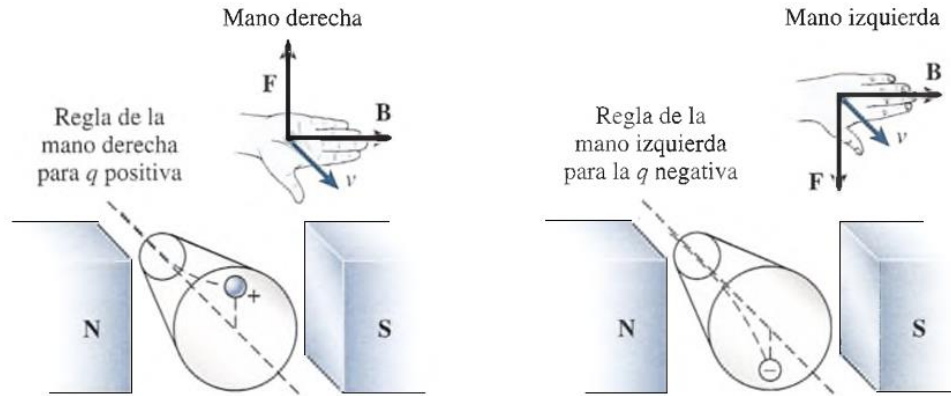


Figura 56 Uso de las reglas de la mano derecha y la mano izquierda para determinar la dirección de la fuerza magnética en una carga en movimiento.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

La regla de la mano derecha: Extienda la mano derecha con los dedos apuntando en la dirección del campo B y el pulgar apuntando en la dirección de la velocidad v de la carga en movimiento. La palma abierta está de cara a la fuerza magnética F sobre una carga positiva.

Si la carga en movimiento es negativa, la dirección de la fuerza se determina siguiendo el mismo procedimiento, pero usando la mano izquierda. De esta manera la dirección de la fuerza magnética es opuesta a la dirección para una carga positiva. Consideremos ahora la magnitud de la fuerza sobre una carga en movimiento. La experimentación ha mostrado que la magnitud de la fuerza magnética es directamente proporcional a la magnitud de la carga q y a su velocidad v . El tubo de ion positivo indicará, por medio de mayores desviaciones, si alguno de estos parámetros aumenta. Se observará una variación no esperada en la fuerza magnética si el tubo del ion se hace girar lentamente respecto a la densidad de flujo magnético B . Como indica la figura 57, para una carga dada con velocidad constante v , la magnitud de la fuerza varía con el ángulo que forma el tubo con el campo. La desviación de la partícula es máxima cuando la velocidad de la carga es perpendicular al campo. Cuando el tubo se hace girar lentamente hacia B , la desviación de la partícula disminuye gradualmente. Por último, cuando la velocidad de la carga tiene una dirección paralela a B , no ocurre ninguna desviación, lo que indica que la fuerza magnética ha caído hasta cero. Claramente la magnitud de la fuerza es función no sólo de la magnitud de la carga y de su velocidad, sino que también varía con el ángulo θ entre v y B . Esta

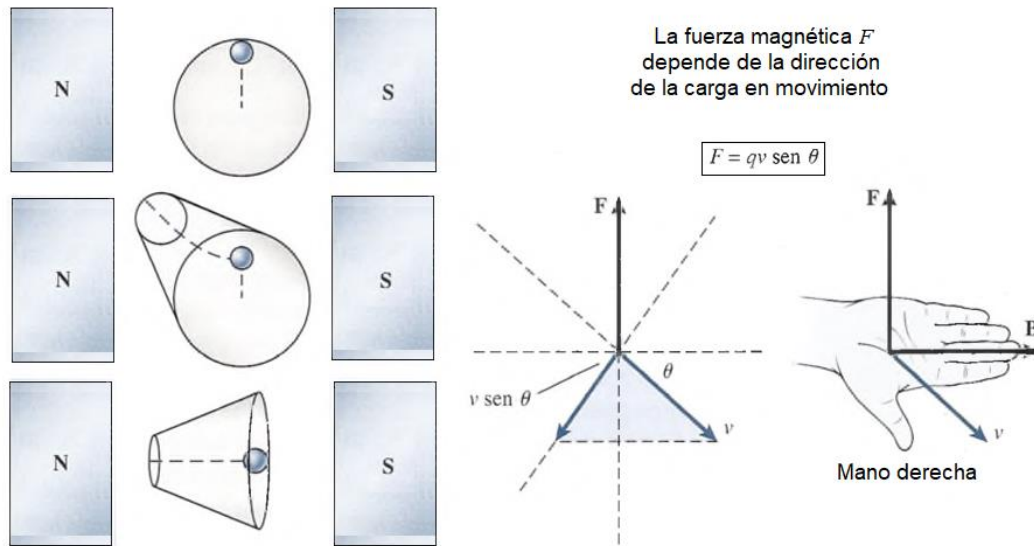


Figura 57 La magnitud de la fuerza magnética adquiere su valor máximo cuando la trayectoria es perpendicular al campo y su valor mínimo cuando es paralela al mismo.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

variación se explica al establecer que la fuerza magnética es proporcional a la componente de la velocidad, $v \text{ sen } \theta$, perpendicular a la dirección del campo. (Consulte la figura 58.) [1]

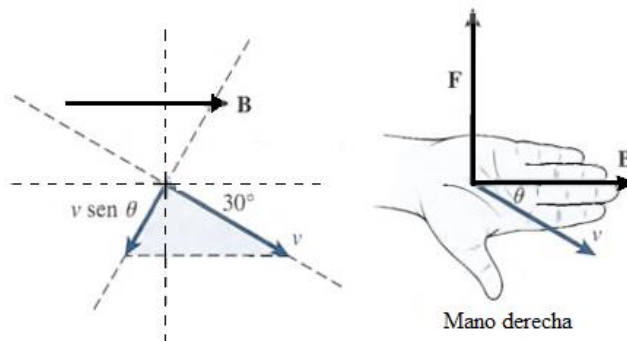


Figura 58 La fuerza magnética en una carga positiva que se mueve a 30° respecto al campo B.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

4.5 Fuerza magnética y par sobre un conductor que conduce corriente.

Cuando una corriente eléctrica I circula por un conductor que yace en un campo magnético B , cada carga q que fluye a través del conductor experimenta una fuerza magnética F . Estas fuerzas se transmiten al conductor como un todo, originando que cada unidad de longitud experimente una fuerza. Si la cantidad total de carga q pasa a través de la longitud L del alambre (figura 59) con una velocidad media v , podemos escribir

$$F = q\bar{v}B$$

La velocidad media para cada carga que recorre la longitud L en el tiempo t es L/t . Entonces, la fuerza neta sobre la longitud completa es

$$F = q \frac{L}{t} B$$

Ahora bien, como $I = q/t$, reordenamos y simplificamos para obtener

$$F = ILB$$

donde I representa la corriente en el alambre.

Del mismo modo que la magnitud de la fuerza sobre una carga en movimiento varía según la dirección de la velocidad, así la fuerza F sobre un conductor por el que fluye corriente depende del ángulo θ que forma la corriente respecto al campo B . En general, si un alambre de longitud l forma un ángulo θ con el campo B , como se ilustra en la figura 59 dicho alambre experimentará una fuerza F dada en newtons por

$$F = ILB \text{ sen } \theta$$

donde I es la corriente que circula por el alambre expresada en amperes, B es el campo magnético expresado en Teslas, L es la longitud del alambre en metros y θ es el ángulo que forma el alambre con respecto al campo B .

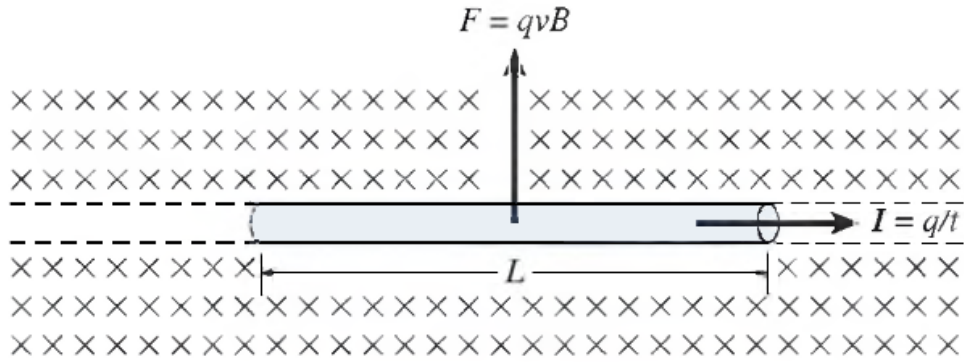


Figura 59 Fuerza magnética sobre un conductor por el cual fluye una corriente.
 Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

La dirección de la fuerza magnética sobre un conductor a través del cual fluye corriente puede determinarse mediante la regla de la mano derecha, en la misma forma que cuando se trata de una carga en movimiento (ya que una corriente está moviendo la carga). Como muestra la figura 60, cuando el pulgar apunta en la dirección de la corriente I y los dedos apuntan en la dirección del campo magnético B , la palma de la mano está de cara a la dirección de la fuerza magnética F . La dirección de la fuerza siempre es perpendicular tanto a I como a B . [1]

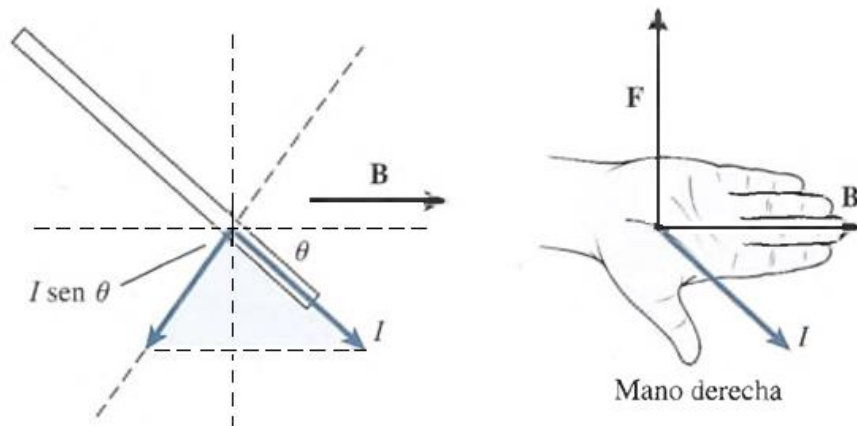
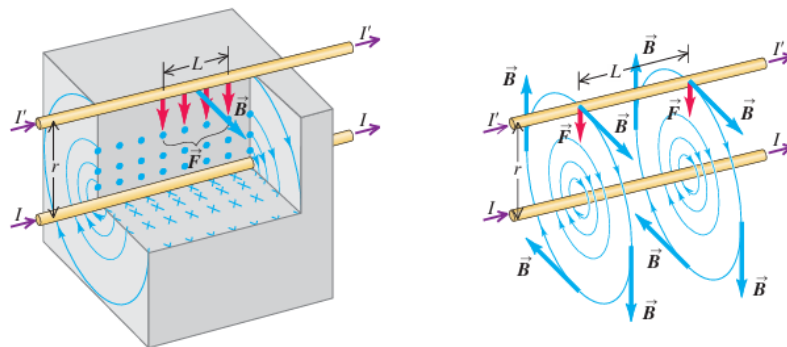


Figura 60 La fuerza magnética sobre un conductor por el cual circula una corriente. La corriente está dirigida a un ángulo θ respecto al campo B .

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

4.6 Fuerza magnética entre conductores paralelos.

El principio de superposición de campos magnéticos se usa para obtener el campo total debido a dos conductores largos portadores de corriente. Otro aspecto importante de esta configuración es la fuerza de interacción entre los conductores. Esta fuerza desempeña un papel importante en muchas situaciones prácticas en las que los alambres portadores de la corriente se hallan muy cerca uno del otro, y también tiene importancia esencial en relación con la definición de ampere. La figura 61 presenta segmentos de dos conductores largos, rectos y paralelos, separados por una distancia r y que portan las corrientes I e I' en el mismo sentido. Cada conductor se encuentra en el campo magnético producido por el otro, por lo que cada uno experimenta una fuerza. El diagrama ilustra algunas de las líneas de campo generadas por la corriente en el conductor de la parte inferior.



El campo magnético del alambre inferior ejerce una fuerza de atracción sobre el alambre superior. De igual modo, el alambre superior atrae al de abajo.

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

Figura 61 Los conductores paralelos que transportan corrientes en el mismo sentido se atraen uno al otro. Los diagramas muestran cómo el campo magnético \vec{B} causado por la corriente del conductor inferior ejerce una fuerza \vec{F} sobre el conductor superior.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39)* (10th ed.). Pearson.

El conductor inferior produce un campo \vec{B} que, en la posición del conductor de arriba, tiene una magnitud

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

La fuerza que ejerce este campo sobre una longitud L del conductor superior es $\vec{F} = I'\vec{L} \times \vec{B}$ donde el vector \vec{L} está en dirección de la corriente I' y tiene magnitud L . Como \vec{B} es perpendicular a la longitud del conductor y por lo tanto, a \vec{L} , la magnitud de esta fuerza es

$$F = I'LB = \frac{\mu_0 I I' L}{2\pi r}$$

Y la fuerza por *unidad de longitud* F/L es

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r} \quad (\text{dos conductores largos, paralelos y portadores de corriente})$$

La aplicación de la regla de la mano derecha a $\vec{F} = I'\vec{L} \times \vec{B}$ indica que la fuerza sobre el conductor de arriba está dirigida *hacia abajo*.

La corriente en el conductor superior también origina un campo en la posición del inferior. Dos aplicaciones sucesivas de la regla de la mano derecha para productos vectoriales (una para encontrar la dirección del campo \vec{B} debido al conductor superior y otra para determinar la dirección de la fuerza que ejerce este campo sobre el conductor de abajo) demuestran que la fuerza sobre el conductor inferior va hacia arriba. Así, *dos conductores paralelos que transportan corrientes en el mismo sentido se atraen uno al otro*. Si se invierte el sentido de cualquiera de las corrientes, las fuerzas también se invertirán. *Dos conductores paralelos que transportan corrientes en sentido opuestos se repelen entre sí.* [2]

4.7 Ley de Faraday

Michael Faraday descubrió que cuando un conductor corta las líneas de flujo magnético, se produce una *fem* entre los extremos de dicho conductor. Por ejemplo, se induce una corriente eléctrica en el conductor de la figura 62a a medida que éste se mueve hacia abajo, atravesando las líneas de flujo. (Con la letra *i* minúscula indicaremos, las corrientes inducidas y las corrientes variables). Cuando más rápido sea ese movimiento, tanto más pronunciada será la desviación de la aguja del galvanómetro. Cuando el conductor se mueve hacia arriba a través de las líneas de flujo se puede hacer una observación similar, excepto que en ese caso la corriente se invierte (véase la figura 62b). Cuando no se cortan las líneas de flujo, por ejemplo, si el conductor se mueve en dirección paralela al campo, no se induce corriente alguna.

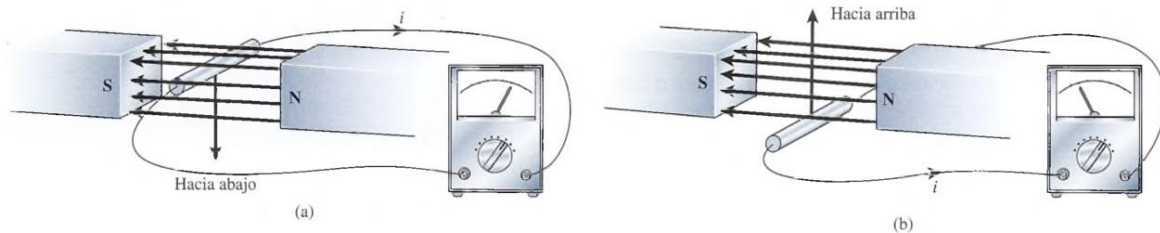


Figura 62 Cuando un conductor corta líneas de flujo magnético se induce una corriente eléctrica.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Supongamos que cierto número de conductores se mueven a través de un campo magnético, como se observa en la figura 63, al descender una bobina de N espiras a través de las líneas de flujo. La magnitud de la corriente inducida es directamente proporcional al número de espiras y a la rapidez del movimiento. Es evidente que se induce una *fem* mediante el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. Cuando la bobina permanece estacionaria y el imán se mueve hacia arriba se observa el mismo efecto

Resumiendo lo que se ha observado mediante estos experimentos, se establece que:

1. El movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce una *fem* en el conductor.

2. La dirección de la *fem inducida* depende de la dirección del movimiento del conductor respecto al campo.

3. La magnitud de la *fem* es directamente proporcional a la rapidez con la que el conductor corta las líneas de flujo magnético.

4. La magnitud de la *fem* es directamente proporcional al número de espiras del conductor que cruza las líneas de flujo.

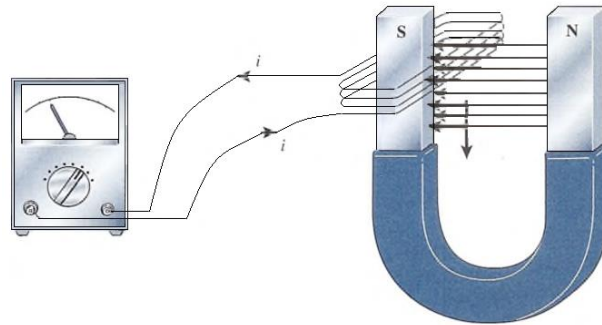


Figura 63 La *fem* inducida en una bobina es proporcional al número de espiras de alambre que cruzan a través del campo.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Una relación cuantitativa para calcular la *fem* inducida en una bobina de N espiras es

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde \mathcal{E} = *fem* media inducida

$\Delta\phi$ = cambio en el flujo magnético durante un espacio de tiempo Δt

Un flujo magnético que cambia con una rapidez de un weber por segundo inducirá una fem de 1 volt por cada espira del conductor. El signo negativo de la ecuación significa que la fem inducida tiene tal dirección que se opone al cambio que la produce.

Ahora analicemos cómo el flujo magnético ϕ que se acopla a un conductor puede cambiar. En el caso más sencillo de un alambre recto que se mueve a través de líneas de flujo, $\Delta\phi/\Delta t$ representa la rapidez con la cual el flujo se acopla a causa de los cambios del conductor. Sin

embargo, para que una corriente inducida exista es necesario que fluya a través de un circuito cerrado, y lo que nos interesa con más frecuencia es la *fem* inducida en una espira o en una bobina de alambre.

Recuerde que el flujo magnético ϕ que pasa a través de una espira de área efectiva A está dado por

$$\phi = BA$$

donde B es la densidad de flujo magnético. Cuando B está en teslas (webers por metro cuadrado) y A está en metros cuadrados, ϕ se expresa en webers. Un cambio en el flujo puede expresarse principalmente en dos formas:

1. Al cambiar la densidad de flujo B a través de una espira de área A :

$$\Delta\phi = (\Delta B)A$$

2. Al cambiar el área efectiva A en un campo magnético de densidad de flujo B constante:

$$\Delta\phi = B(\Delta A)$$

Dos ejemplos de densidad de flujo variable a través de una bobina estacionaria de área constante se ilustran en la figura 64. En la figura 64a, el polo norte de un imán se mueve a través de una bobina circular. La variación de la densidad de flujo induce una corriente en la bobina, como lo indica el galvanómetro. En la figura 64b no se induce corriente en la bobina B mientras la corriente en la bobina A sea constante. Sin embargo, mediante una rápida variación de la resistencia en el circuito izquierdo, la densidad de flujo magnético que llega a la bobina B puede aumentar o disminuir. Mientras la densidad de flujo está cambiando se induce una corriente en la bobina de la derecha.

Observe que cuando el polo norte N del imán se mueve en la bobina en la figura 64a, la corriente fluye en la dirección de las manecillas del reloj si vemos hacia el imán. Por tanto, el extremo de la bobina cerca del polo N del imán se vuelve también un polo N (regla del pulgar de la mano derecha). El imán y la bobina experimentarán una fuerza de repulsión, por lo cual será necesario ejercer una fuerza para juntarlos. Si se extrae el imán de la bobina, existirá una fuerza de atracción que hace necesario ejercer una fuerza para separarlos. [1]

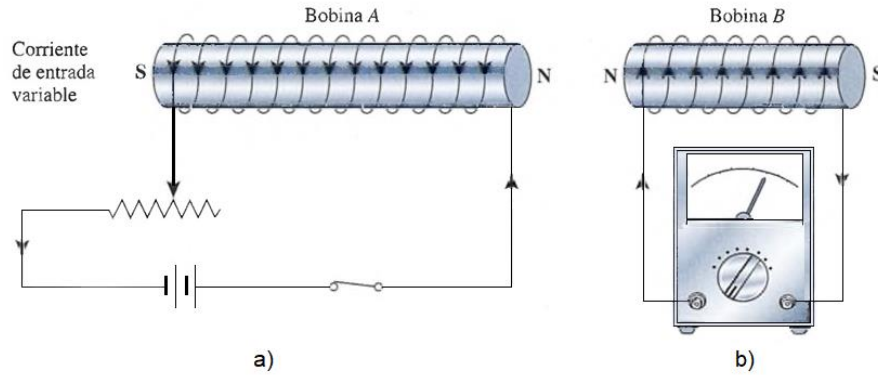


Figura 64 (a) Inducción de una corriente por medio del movimiento de un imán que se desplaza dentro de una bobina, (b) Una corriente variable que circula por la bobina A induce una corriente en la bobina B.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Ejemplo

Una bobina de alambre que tiene un área de $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ se coloca en una región de densidad de flujo constante igual a 0.65 T . En un intervalo de 0.003 s , la densidad de flujo aumenta a 1.4 T . Si la bobina consta de 50 espiras de alambre, ¿cuál es la *fem* inducida?

Plan: En este caso, el área que el flujo penetra no cambia, y toda la *fem* inducida es producida por un campo B variable. Si consideramos que el cambio en el flujo es producto del área y del cambio en B , podemos determinar el cambio en el flujo y usarlo para calcular la *fem* inducida a partir de la Ley de Faraday.

Solución: Primero calcularemos el cambio en el flujo.

$$\Delta\phi = (\Delta B)A = (B_f - B_0)A$$

$$\Delta\phi = (1.4 \text{ T} - 0.65 \text{ T})(2 \times 10^{-3} \text{ m}^2) = 1.5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Para determinar la *fem* inducida, sustituimos este cambio

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{-N\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\mathcal{E} = \frac{-(20 \text{ espiras})(1.5 \times 10^{-3} \text{ Wb})}{0.003 \text{ s}} = -10 \text{ V}$$

La *fem* negativa indica oposición al flujo en aumento.

4.8 Ley de Lenz

La dirección de la *fem* inducida y la corriente inducida pueden ser determinadas de la Ley de Lenz (Heinrich Lenz), la cual puede ser establecida como sigue:

La polaridad de a fem inducida es tal que tiende a producir una corriente que crea un flujo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético a través del circuito.

Es decir, la corriente inducida tiende a mantener el flujo original a través del circuito. La interpretación de este enunciado depende de las circunstancias. Esta Ley es una consecuencia de la Ley de la conservación de la energía.

Para comprender mejor la Ley de Lenz veamos el ejemplo de la barra que se mueve hacia la derecha sobre 2 rieles paralelos en presencia de un campo magnético dirigido perpendicularmente hacia adentro del papel. Figura 65

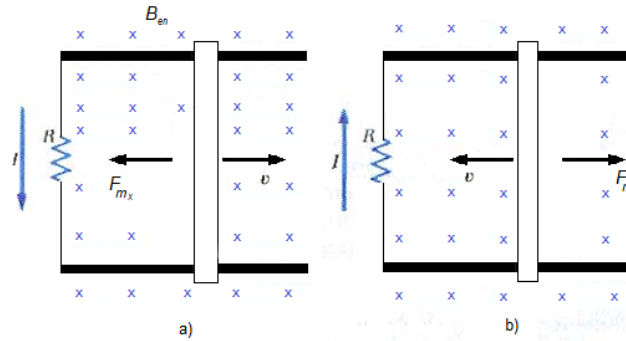


Figura 65 Movimiento de barra sobre rieles paralelos en un campo magnético.
 Fuente: Serway. (2000). *Electricidad y magnetismo - 4 edición*. McGraw-Hill Interamericana.

Cuando la barra hacia la derecha, el flujo magnético a través del circuito aumenta con el tiempo ya que el área de la espira aumenta. La Ley de Lenz dice que la corriente inducida debe de ser en la dirección tal que el flujo que produzca se oponga al cambio en el flujo magnético externo. Como el flujo debido al campo externo aumenta hacia adentro del papel, la corriente inducida, si ésta se debe oponer al cambio, debe producir un flujo hacia afuera del papel. Por lo tanto, la corriente inducida debe circular en dirección contraria a las manecillas del reloj cuando la barra se mueva hacia la derecha para dar un flujo hacia afuera del papel en la región interna del circuito. (Utilícese la regla de la mano derecha para verificar esta dirección). Por otro lado, si la barra se mueva hacia la izquierda, como en la figura 65b, el flujo magnético a través del circuito disminuye con el tiempo.

Como el flujo está hacia adentro del papel, la corriente inducida tiene que circular en dirección de las manecillas del reloj para producir un flujo hacia adentro del papel en el interior del circuito. En ambos casos, la corriente inducida tiende a mantener el flujo original a través del circuito.

Se verá esta situación desde el punto de vista de consideraciones energéticas. Supóngase que a la barra se le da un ligero empujón hacia la derecha. En el análisis anterior se encontró que este movimiento genera en el circuito una corriente que circula en dirección contraria a las manecillas del reloj. Ahora véase que sucede si se supone que la corriente circula en dirección de las manecillas del reloj. Para una corriente I , que circula en sentido de las manecillas del reloj, la dirección de la fuerza magnética sobre una barra que se desliza sería hacia la derecha. Esta fuerza aceleraría la barra y aumentaría su velocidad. Esto a su vez ocasionaría que el área del

circuito aumentara más rápido, lo que aumentaría la corriente inducida, con lo cual se incrementaría la fuerza, con lo cual se incrementaría la corriente, con lo cual... En efecto, el sistema adquiriría energía sin necesidad de darle energía. Esto claramente es incongruente con la experiencia y con la ley de la conservación de la energía. Así que se ve uno forzado a concluir que la corriente debe circular en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Considérese otra situación, una en la cual el imán de barra se mueve hacia la derecha introduciéndose en una espira estacionaria, como en la figura 66a. Cuando el imán se mueve hacia la derecha introduciéndose en la espira, el flujo magnético a través de la espira aumenta con el tiempo. Para contrarrestar este aumento en el flujo hacia la derecha, la corriente inducida produce un flujo hacia la izquierda como en la figura 66b, por lo que la corriente inducida está en la dirección mostrada. Obsérvese que las líneas de campo magnético asociada con la corriente inducida se oponen al movimiento del imán. Por lo tanto, en la cara izquierda de la espira de corriente está el polo norte y en la cara derecha está el polo sur.

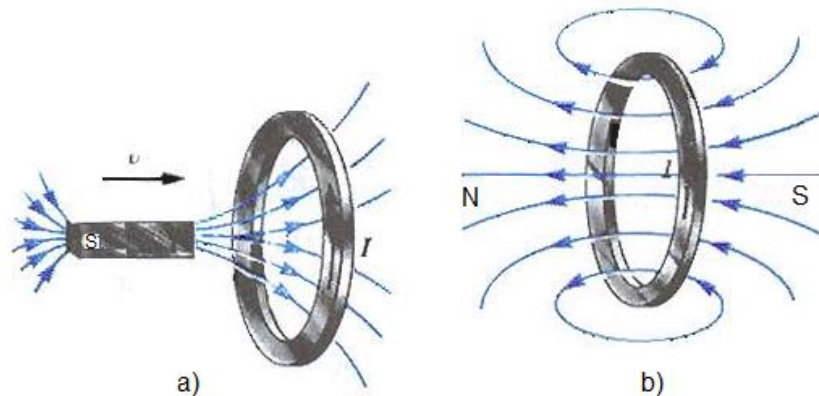


Figura 66 Imán de barra se introduce en espira estacionaria.

Fuente: Serway. (2000). *Electricidad y magnetismo - 4 edición*. McGraw-Hill Interamericana.

Por otro lado, si el imán se estuviera moviendo hacia la izquierda, su flujo a través de la espira, el cual está hacia la derecha, disminuiría con el tiempo. En estas circunstancias, la corriente inducida en la espira deberá ser en una dirección tal que genere un campo de líneas de flujo. Por lo tanto, la corriente la corriente inducida en la espira deberá ser opuesta a la mostrada en la figura 66b. En este caso, la cara izquierda de la espira sería el polo sur y la cara derecha sería el polo norte. [3]

4.9 Introducción a Leyes de Maxwell

Presentamos cuatro ecuaciones que pueden considerarse como las piedras angulares de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Estas ecuaciones conocidas como *ecuaciones de Maxwell*, después de James Clerk Maxwell, son tan fundamentales para los fenómenos electromagnéticos como las leyes de Newton lo son al estudio de fenómenos mecánicos. En realidad, la teoría desarrollada por Maxwell fue de mayores alcances por lo que Él imaginó en su época, puesto que resultaron estar en completa concordancia con la teoría especial de la relatividad que Einstein demostró en 1905. Como se verá, las ecuaciones de Maxwell representan las leyes principales de la electricidad y del magnetismo. Sin embargo, las ecuaciones tienen consecuencias adicionales de vital importancia. Se ha demostrado que estas ecuaciones predicen la existencia de ondas electromagnéticas (patrones viajeros de campos eléctricos y magnéticos), los cuales viajan con una velocidad $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, la velocidad de la luz. Además, demuestra que tales ondas son radiadas por cargas aceleradas.

Por razones de comodidad, las ecuaciones de Maxwell se presentan aplicadas en el espacio libre, es decir en ausencia de cualquier material dieléctrico o magnético. Las cuatro ecuaciones son:

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \text{Ley de Gauss}$$

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad \text{Ley de Gauss del magnetismo}$$

$$\oint E \cdot dS = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad \text{Ley de Faraday}$$

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_e}{dt} \quad \text{Ley de Ampère – Maxwell}$$

Ahora se analizarán estas ecuaciones una por una. La primera ecuación es la Ley de Gauss, la cual establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de esa superficie dividida entre la constante ϵ_0 . Esta ley relaciona el campo eléctrico con la distribución de carga, donde las líneas de campo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en las cargas negativas.

La segunda ecuación, la cual puede ser considerada la *ley de Gauss del magnetismo*, establece que el flujo magnético total a través de una superficie cerrada es cero, Es decir el número de líneas de campo magnético que entran en un volumen cerrado debe ser igual al número de líneas que abandonan el volumen. Esto implica que las líneas de campo magnético no pueden empezar o terminar en ningún punto. Si lo hicieran esto significaría que existirían monopolos magnéticos aislados en esos puntos. El hecho de que hasta el momento no se han observado polos aislados o monopolos es una confirmación de esta ecuación.

La tercera ecuación es la Ley de inducción de Faraday, la cual describe la relación entre un campo eléctrico y un flujo magnético variable. La Ley enuncia que la integral de línea del campo eléctrico alrededor de cualquier trayectoria cerrada (la cual es igual a la *fem*) es igual a la razón de variación del flujo magnético a través de cualquier área superficial limitada por esa trayectoria. Una consecuencia de la Ley de Faraday es la corriente inducida en una espira conductora colocada en un campo magnético que varía con el tiempo.

La cuarta ecuación es la forma generalizada de la Ley de Ampère, la cual describe la relación entre los campos eléctrico y magnético y las corrientes eléctricas. Esto es, la integral de línea del campo magnético alrededor de cualquier trayectoria cerrada se determina mediante la suma de la corriente de conducción total a través de la trayectoria y la razón de variación de flujo eléctrico a través de cualquier superficie limitada por esa trayectoria.

Una vez que se conocen los campos eléctricos y magnéticos en algún punto determinado del espacio, la fuerza que actúa sobre una partícula de carga q puede calcularse con la expresión

$$F = qE + qv \times B$$

Esta se denomina fuerza de *Lorentz*. Las ecuaciones de *Maxwell*, junto con esta ley de fuerza, proporcionan una descripción completa de todas las interacciones electromagnéticas.

Es interesante hacer notar la simetría que guardan las ecuaciones de Maxwell. Las 2 ecuaciones de Gauss son simétricas con excepción de la ausencia del término monopolo magnético en la ecuación de Gauss de magnetismo. Además, la ecuación de Faraday y Ampère son simétricas, ya que las integrales de línea de E y B alrededor de una trayectoria cerrada se relacionan con la razón de variación del flujo magnético y del flujo eléctrico respectivamente. “Las maravillosas ecuaciones de Maxwell” como las llamó John R. Pierce, tienen una gran importancia no solo en el campo de la electrónica sino en toda la ciencia, Heinrich Hertz una vez escribió “no se puede escapar del sentimiento de admiración por estas fórmulas matemáticas que tienen una existencia independiente y una inteligencia innata, que son más sabias de lo que pudiéramos ser, más sabias que sus descubridores; que se puede obtener mucho más de ellas que lo que nosotros pudiéramos poner en ellas”. [3]

4.10 Seguimiento al proyecto seleccionado

UNIDAD 5 Inducción Electromagnética

Competencias

Específica:

- Comprende el concepto de inductancia y su efecto en las máquinas eléctricas
- Calcula la fuerza electromotriz inducida y saber aplicarla a diferentes problemas.

Genéricas:

- Capacidad de análisis y síntesis
- Habilidades interpersonales
- Habilidades de investigación
- Capacidad de aprender

5.1 Definición de inductancia

Otro elemento importante en un circuito de ca es el inductor, que consta de una espira o bobina continua de alambre (véase la figura 67). Se demostró que un cambio en el flujo magnético en la región encerrada por la bobina inducirá una fem en la bobina. Hasta aquí hemos visto que los cambios de flujo se deben a fuerzas externas a la bobina misma. Ahora se considerará la fem inducida en una bobina como resultado de los cambios en su propia corriente. Independientemente de la forma en que ocurre el cambio de flujo, la fem inducida se calcula por

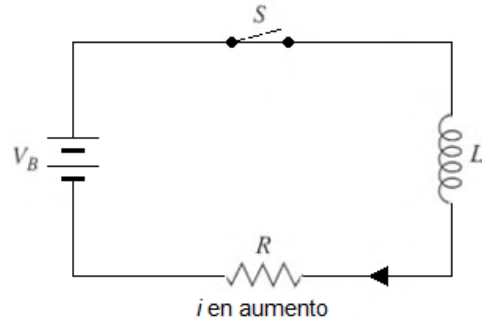


Figura 67 El inductor.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

Flujo $\Delta\phi/\Delta t$, o la *fem* inducida \mathcal{E} , es proporcional a la razón de cambio de la corriente, $\Delta i/\Delta t$. Esta proporcionalidad se expresa en la ecuación

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

La constante de proporcionalidad L se llama la **inductancia** del circuito. Resolviendo para la inductancia se obtiene

$$L = -\frac{\mathcal{E}}{\Delta i/\Delta t}$$

La unidad de inductancia es el **henry (H)**.

Un inductor tiene una inductancia de un henry (H) si una fem de un volt se induce por medio de una corriente que cambia a una razón de un ampere por segundo.

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$$

La inductancia de una bobina depende de su geometría, del número de espiras, del espaciamiento entre éstas y de la permeabilidad de su núcleo, pero no de los valores del voltaje y la corriente. En cuanto a esto, el inductor es similar a los condensadores y a los resistores.

Ahora estudiaremos el crecimiento y el decaimiento de la corriente en un circuito inductivo. El circuito que se presenta en la figura 68 incluye un inductor L , un resistor R y una batería V_B .

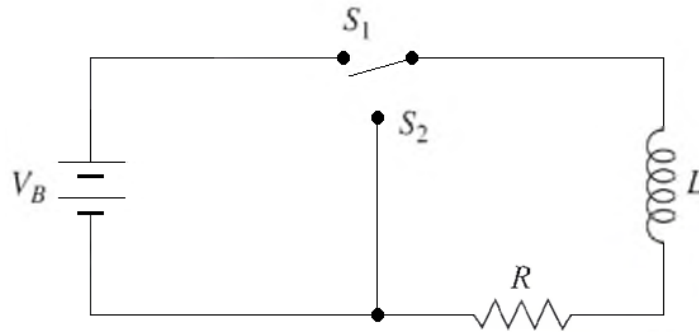


Figura 68 Circuito para estudiar la inductancia.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.

El interruptor se coloca de tal modo que la batería pueda conectarse y desconectarse alternadamente del circuito. Cuando el interruptor se coloca en la posición S_1 empieza a crecer una corriente en el circuito. A medida que ésta aumenta, se establece la *fem* inducida $-L(\Delta i/\Delta t)$ en oposición al voltaje de la batería V_B . La *fem* neta debe ser igual a la caída de potencial iR por el resistor; en consecuencia,

$$V_B - L \frac{\Delta i}{\Delta t} = iR$$

Un análisis matemático de esta ecuación permite demostrar que la elevación de la corriente en función del tiempo se obtiene por medio de

$$i = \frac{V_B}{R} (1 - e^{-(R/L)t})$$

Esta ecuación muestra que la corriente i es igual a cero cuando $t = 0$ y que tiene un máximo $\frac{V_B}{R}$ cuando $t = \infty$. El efecto de la inductancia en un circuito es retrasar el establecimiento de esta corriente máxima. La elevación y el decaimiento de la corriente en un circuito inductivo se muestra en la figura 69.

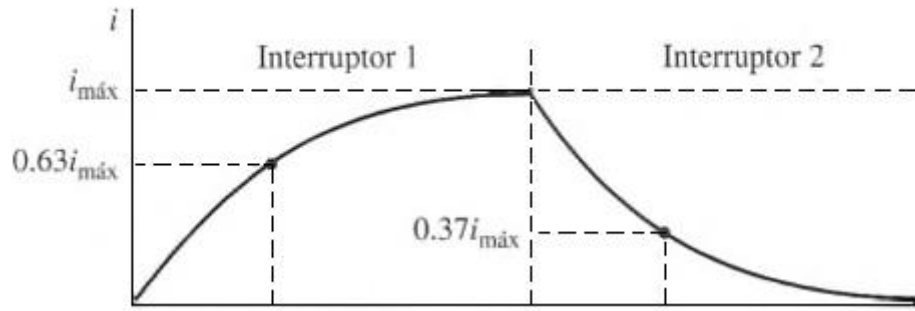


Figura 69 Elevación y decaimiento de la corriente en un inductor.

Fuente: Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b** Edición. McGraw-Hill Companies.

La constante de tiempo para un circuito inductivo es

$$\tau = \frac{L}{R}$$

τ está en segundos cuando L se expresa en henrys y R en ohms. Si se introduce este valor en la ecuación de la i es posible demostrar que:

En un circuito inductivo la corriente se elevará al 63% de su valor máximo en una constante de tiempo (L/R).

Después de que la corriente en el circuito que se ilustra en la figura 68 ha alcanzado un valor estacionario, si el interruptor se mueve a la posición S_2 , la corriente decaerá exponencialmente, como se aprecia en la figura 69. La ecuación que permite expresar el decaimiento es

$$i = \frac{V_B}{R} e^{-(R/L)t}$$

La sustitución de L/R en la ecuación muestra que:

En un circuito inductivo, la corriente decae a 37% de su valor máximo en una constante de tiempo igual a (L/R).

Una vez más, por razones prácticas se considera que el tiempo de elevación o decaimiento para un inductor es cinco veces la constante de tiempo ($5L/R$). [1]

5.2 Enlaces de flujo

El flujo magnético es una medida del campo magnético total que pasa a través de un área dada. Es una herramienta útil para describir los efectos de la fuerza magnética en algún objeto que ocupa un área dada. La medición del campo magnético está atada al área particular de elección. Podemos escoger como queramos el tamaño del área y su orientación relativa al campo magnético.

Si usamos la representación de líneas de campo del campo magnético, entonces cada línea de campo que atraviesa un área dada contribuye con algo de flujo magnético. El ángulo al cual la línea de campo se interseca con el área también es importante. Una línea de campo que penetra de forma rasante contribuye con una pequeña componente de campo al flujo magnético. Cuando calculamos el flujo magnético, solamente incluimos la componente del vector de campo magnético que es normal a nuestra área de prueba.

Los enlaces de flujo magnético son las líneas de fuerza que se separan unas de otras y del imán, tangencialmente a la dirección del campo en cada punto. Este recorrido de las líneas de fuerza es el circuito magnético y la cantidad que lo forman se llama flujo magnético. El flujo magnético es una medida del campo magnético total que pasa a través de un área dada. Es una herramienta útil para describir los efectos de la fuerza magnética en algún objeto que ocupa un área dada.

La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el weber (símbolo Wb). Su nombre se deriva del físico alemán Wilhelm Eduard Weber, quien realizó contribuciones significativas al estudio del magnetismo y la electricidad durante el siglo XIX. [15]

5.3 Energía asociada al campo magnético

El establecimiento de una corriente en un inductor requiere un suministro de energía, y un inductor que conduce corriente contiene energía almacenada. Veamos cómo sucede esto. En la figura 70, una corriente creciente i en el inductor produce una *fem* \mathcal{E} entre sus terminales, y una diferencia de potencial correspondiente V_{ab} entre las terminales de la fuente, con el punto a a mayor potencial que el b . Así, la fuente debe estar agregando energía al inductor, y la potencia instantánea P (la tasa de transferencia de energía al inductor) es $P = V_{ab}i$.

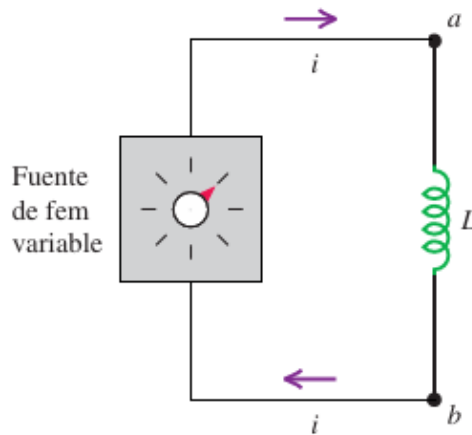


Figura 70 Circuito que contiene una fuente de *fem* y un inductor. La fuente es variable, por lo que la corriente i y su tasa de cambio di/dt pueden variarse.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39)* (10th ed.). Pearson.

Si la corriente inicial es igual a cero, con la inductancia L podemos calcular la entrada total de energía U necesaria para establecer una corriente final I en un inductor. Suponemos que el inductor tiene una resistencia igual a cero, por lo que dentro del inductor no se disipa energía. Sea i la corriente en cierto instante y su tasa de cambio di/dt ; la corriente va en aumento, de manera que $di/dt > 0$. El voltaje entre las terminales a y b del inductor en ese instante es $V_{ab} = L di/dt$, y la tasa P a la que se entrega energía al inductor (igual a la potencia instantánea suministrada por la fuente) es

$$P = V_{ab}i = Li \frac{di}{dt}$$

La energía dU suministrada al inductor durante un intervalo de tiempo infinitesimal dt es $dU = P dt$, por lo que

$$dU = Li di$$

La energía total U suministrada mientras la corriente aumenta de cero a un valor final I es

$$U = L \int_0^I i di = \frac{1}{2}LI^2 \quad (\text{energía almacenada en un inductor})$$

Una vez que la corriente ha alcanzado su valor final estable I , $di/dt = 0$, y no se alimenta más energía al inductor. Cuando no hay corriente, la energía almacenada U es igual a cero; cuando la corriente es I , la energía es $(1/2)LI^2$

Cuando la corriente disminuye de I a cero, el inductor actúa como fuente que suministra una cantidad total de energía igual a $(1/2)LI^2$ al circuito externo. Si interrumpimos bruscamente el circuito abriendo un interruptor o desconectando violentamente una clavija (enchufe) de una toma de corriente de pared, la corriente disminuye con mucha rapidez, la *fem* inducida es muy grande y la energía podría disiparse en forma de un arco entre los contactos del interruptor. Esta *fem* elevada es la analogía eléctrica de la gran fuerza que ejerce un automóvil en movimiento que se estrella contra un muro sólido y se detiene en forma súbita. [2]

5.4 Inductancia mutua

La interacción magnética entre dos alambres que transportan corrientes estables, establece que la corriente en uno de los alambres genera un campo magnético que ejerce una fuerza sobre la corriente en el otro alambre. Pero cuando hay una corriente *variable* en uno de los circuitos, surge una interacción adicional. Considere dos bobinas de alambre cerca una de la otra, como se ilustra en la figura 71.

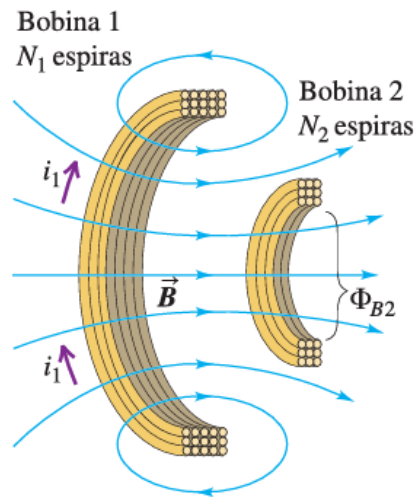


Figura 71 La corriente en la bobina i_1 da origen a un flujo magnético a través de la bobina 2.

Fuente: Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39)* (10th ed.). Pearson.

Una corriente que circula por la bobina 1 produce un campo magnético \vec{B} y, por lo tanto, un flujo magnético a través de la bobina 2. Si la corriente en la bobina 1 cambia, el flujo a través de la bobina 2 también cambia; de acuerdo con la ley de Faraday, esto induce una *fem* en la bobina 2. De este modo, un cambio en la corriente de un circuito puede inducir otra corriente en un segundo circuito.

Analícemos con más detalle la situación que aparece en la figura 71. Para representar las cantidades que varían con el tiempo usaremos letras minúsculas; por ejemplo, una corriente variable en el tiempo se representa con i , a menudo con un subíndice para identificar el circuito. En la figura 71, una corriente i_1 establece un campo magnético (indicado por las líneas de color azul), y algunas de estas líneas de campo pasan a través de la bobina 2. Denotaremos con ϕ_{B2}

el flujo magnético a través de cada es pira de la bobina 2, causado por la corriente i_1 en la bobina 1. (Si el flujo es diferente a través de las distintas espiras de la bobina, entonces ϕ_{B2} denota el flujo medio.) El campo magnético es proporcional a i_1 , de manera que ϕ_{B2} también es proporcional a i_1 . Cuando i_1 cambia, ϕ_{B2} cambia; este flujo cambiante induce una *fem* \mathcal{E}_2 en la bobina 2, dada por

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\phi_{B2}}{dt}$$

Podríamos representar la proporcionalidad entre ϕ_{B2} e i_1 en la forma $\phi_{B2} = k i_1$ (constante k), pero, en vez de ello, es más conveniente incluir el número de espiras N_2 en la relación. Al introducir una constante de proporcionalidad M_{21} , llamada **inductancia mutua** de las dos bobinas, escribimos

$$N_2 \phi_{B2} = M_{21} i_1$$

donde ϕ_{B2} es el flujo a través de una sola espira de la bobina 2. De ahí que,

$$N_2 \frac{d\phi_{B2}}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

Reescribiendo la ecuación tenemos

$$\mathcal{E}_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

Es decir, un cambio en la corriente i_1 en la bobina 1 induce una *fem* en la bobina 2, que es directamente proporcional a la tasa de cambio de i_1 . También se podría escribir la definición de la inductancia mutua, como

$$M_{21} = \frac{N_2 \phi_{B2}}{i_1}$$

Si las bobinas están en el vacío, el flujo ϕ_{B2} a través de cada espira de la bobina 2 es directamente proporcional a la corriente i_1 . Entonces, la inductancia mutua M_{21} es una constante que sólo depende de la geometría de las dos bobinas (el tamaño, la forma, el número de espiras y la orientación de cada una, así como la separación entre ellas). Si está presente un material magnético, M_{21} también depende de las propiedades magnéticas de éste. Si el material tiene propiedades magnéticas no lineales, es decir, si la permeabilidad relativa K_m no es constante y la magnetización no es proporcional al campo magnético, entonces ϕ_{B2} deja de ser directamente proporcional a i_1 . En ese caso, la inductancia mutua también depende del valor de i_1 . En este análisis supondremos que cualquier material magnético que esté presente tiene una K_m constante, por lo que el flujo es directamente proporcional a la corriente y M_{21} sólo depende de la geometría.

Podría volverse a hacer el análisis para el caso opuesto, en el que una corriente cambiante i_2 en la bobina 2 causa un flujo cambiante ϕ_{B1} y una *fem* \mathcal{E}_1 en la bobina 1. Esperaríamos que la constante correspondiente M_{12} fuera diferente de M_{21} porque, en general, las dos bobinas no son idénticas y el flujo a través de ellas no es el mismo. Sin embargo, M_{12} siempre es igual a M_{21} , aun cuando las dos bobinas no sean simétricas. A este valor común lo llamamos simplemente inductancia mutua, y lo denotamos con el símbolo M , sin subíndices; este valor caracteriza por completo la interacción de la *fem* inducida de las dos bobinas. De esta forma, podemos escribir

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad \text{y} \quad \mathcal{E}_1 = -M \frac{di_2}{dt} \quad (\text{fem mutuamente inducidas})$$

donde la inductancia mutua M es

$$M = \frac{N_2 \phi_{B2}}{i_1} = \frac{N_1 \phi_{B1}}{i_2} \quad (\text{inductancia mutua})$$

Los signos negativos en la ecuación son un reflejo de la Ley de Lenz. La primera ecuación dice que un cambio en la corriente en la bobina 1 provoca un cambio en el flujo magnético a través de la bobina 2, lo que induce una *fem* en esta última que se opone al cambio del flujo; en la segunda ecuación las dos bobinas intercambian su papel.

La unidad del SI para la inductancia mutua se llama **henry** ($1 H$), en honor del físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878), uno de los descubridores de la inducción electromagnética. Un henry es igual a un *weber por ampere*. Otras unidades equivalentes obtenidas son un *volt-segundo por ampere*, un *ohm-segundo*, o un *joule*

$$1 H = 1 Wb/A = 1 V \cdot s/A = 1 \Omega \cdot s = 1 J/A^2$$

Así como el Farad es una unidad muy grande de capacitancia, el henry es una unidad muy grande de inductancia mutua. Los valores comunes de la inductancia mutua son del orden del *milihenry* (mH) o *microhenry* (μH). [2]


5.5 Conclusión y revisión del proyecto seleccionado

REFERENCIAS

- [1] Tippens, P. (2000). *Física - Conceptos y Aplicación 5b* Edición*. McGraw-Hill Companies.
- [2] Young, H., Freedman, R. A., & Sandin, T. R. (1999). *Sears and Zemansky's University Physics, volume 2: Electricity & Magnetism, Optics, Relativity (chapters 22-39)* (10th ed.). Pearson.
- [3] Serway. (2000). *Electricidad y magnetismo - 4 edición*. McGraw-Hill Interamericana.
- [4] Por, M. (2023, June 11). ¿Qué es un superconductor? Electricity - Magnetism. <https://www.electricity-magnetism.org/es/que-es-un-superconductor/>
- [5] (N.d.). Unam.Mx. Retrieved June 25, 2024, from https://dctrl.fi-b.unam.mx/academias/aca_ace/txt/02_Capacitancia_diel.pdf
- [6] Montiel, P., & Héctor. (2020). *Física general*. Grupo Editorial Patria.
- [7] ¿Qué es la resistividad eléctrica? (2022, September 1). Blog. <https://www.sondagua.cl/blog/que-es-la-resistividad-electrica/>

- [8] Código de Colores para los resistores. Unam.Mx. Retrieved August 2, 2024, from http://dcb.fic.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/docs/CC_Resistores.pdf
- [9] Por, M. (2023a, June 11). ¿Qué es un divisor de corriente? Electricity - Magnetism. <https://www.electricity-magnetism.org/es/que-es-un-divisor-de-corriente-2/>
- [10] *Ley de Joule*. (2019, June 24). Revista eléctrica. <https://electronica.mx/ley-de-joule/>
- [11] w8ikj. (2024, February 20). *Energía potencial electrostática: concepto y aplicaciones*. Mundoenergia.top. <https://mundoenergia.top/energia-potencial-electrostatica-concepto-y-aplicaciones/>
- [12] Rodriguez, C. S. (2024, May 23). 🔍 *Título SEO: Ejemplos Prácticos de la Ley de Coulomb: ¡Descubre su Aplicación en la Vida Diaria!* 🚀. Mi Guia Ceneval. <https://miguiaceneval.mx/%F0%9F%94%8D-titulo-seo-ejemplos-practicos-de-la-ley-de-coulomb-descubre-su-aplicacion-en-la-vida-diaria-%F0%9F%9A%80/>
- [13] *La Importancia del Potencial Eléctrico en la Física*. (n.d.). Algoreducation.com. Retrieved August 15, 2024, from <https://cards.algoreducation.com/es/content/2768TsAg/importancia-potencial-electrico>
- [14] Leskow, E. C. (n.d.). *Aislante Eléctrico - Concepto, aplicaciones y ejemplos*. Retrieved August 15, 2024, from <https://concepto.de/aislante-electrico/>

- [15] ¿Qué es el flujo magnético? (artículo). (n.d.). Khan Academy. Retrieved August 19, 2024, from <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-magnetic-flux>

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 155 de 181

INSTRUMENTACIÓN DIDÁCTICA

Tecnológico Nacional de México

Subdirección Académica o su equivalente en los Institutos Tecnológicos Descentralizados

Instrumentación didáctica para la formación y desarrollo de competencias Profesionales

Periodo: AGOSTO-DICIEMBRE 2024

Nombre de la asignatura: ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Plan de Estudios: IEME-2010-210

Clave de la asignatura: EMCF-1011

Horas teoría-Horas prácticas-Créditos: 2-2-4


1. Caracterización de la asignatura

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Electromecánico la capacidad para explicar fenómenos de naturaleza eléctrica y/o magnética involucrados en los circuitos eléctricos, los dispositivos magnéticos y electromecánicos, la sensibilidad y conocimientos para aplicarlos en los sistemas electromecánicos.

Es la base para las asignaturas de análisis de circuitos en c.d., Electrónica analógica, Análisis de circuitos en c.a., Electrónica digital, Instalaciones eléctricas, Controles eléctricos, Subestaciones eléctricas, entre otras que son fundamentales para la formación del ingeniero electromecánico.

Puesto que esta materia da soporte a otras, más directamente vinculadas con desempeños profesionales, se inserta en la primera mitad de la trayectoria escolar; antes de cursar aquéllas a las que da soporte.

De manera particular, lo trabajado en esta asignatura se aplica en el estudio de los temas: Electrostática, Capacitancia, Electrodinámica, Campo Magnético e Inducción.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0 Página 156 de 181

2. Intención Didáctica

La asignatura está organizada en el estudio de cinco temas, para abordar los conceptos, leyes y principios fundamentales de cada tema a lo largo de toda la asignatura e incluye la realización de un proyecto para la aplicación de los conceptos abordados.

Se inicia con recorrido histórico para el cual se sugiere la publicación “Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología”². El objetivo de ello es ilustrar la dependencia entre el conocimiento científico y las aplicaciones tecnológicas den campo de estudio: el electromagnetismo.

La razón de esto es porque una vez llevados a cabo los descubrimientos científicos estos tuvieron inmediata aplicación práctica y también viceversa pues las aplicaciones prácticas fomentaron la investigación científica para resolver diferentes problemas, lo cual a su vez abrió nuevos horizontes científicos.

Se sugiere un recorrido histórico con carácter general que inicie con las propiedades observadas por el hombre desde tiempos inmemoriales de la electricidad por un lado y del magnetismo por el otro. El descubrimiento de la relación entre estos dos campos, resaltando que no son independientes. Hablar de los trabajos de Christian Oersted, André-Marie Ampere y Michael Faraday.

Enfatizar que el conocimiento científico de la relación entre electricidad y magnetismo dio lugar a las aplicaciones tecnológicas importantes, como el telégrafo, los motores eléctricos y generadores de electricidad a partir de lo cual el ser humano tuvo a su disposición fuentes de corriente eléctrica.

También subrayar que esto cambio drásticamente la forma de vida de la humanidad, teniendo como consecuencias la iluminación eléctrica y el teléfono, entre otras y con ello la creación los primeros laboratorios industriales y la producción industrial que desempeñaron un papel primordial en los subsiguientes avances.

Mencionar como James Clerk Maxwell a partir de los trabajos de Ampere y Faraday sobre la electricidad y el magnetismo, desarrollo una teoría que predijo la existencia de las ondas electromagnéticas y naturaleza eléctrica y magnética de la luz. Y como esa teoría a su vez sirvió para el desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.


Ilustrar como años después, Hertz llevó a cabo un experimento para indagar si en la naturaleza efectivamente existen ondas electromagnéticas. Señalar como los trabajos de Maxwell y Hertz tuvieron como consecuencia el inicio de las comunicaciones inalámbricas. Sería también interesante considerar como los trabajos de Marconi que dieron como resultado el telégrafo inalámbrico.

La necesidad de desarrollar la radiotelefonía precipitó el inicio de la electrónica moderna y al lograr la comprensión de funcionamiento de los tubos al vacío surge: la radio y posteriormente la televisión, y las repercusiones que esto han tenido.

La invención del radar y el papel determinante que desempeñó en la victoria de los ingleses en la llamada Batalla de Inglaterra y como fue decisiva en la posterior derrota de la Alemania nazi.

La invención de las primeras las computadoras electrónicas. La invención del transistor. La base cuántica para describir la estructura microscópica de los sólidos y como ello trajo como consecuencia un torrente de aplicaciones y de mejoras entre ellas la miniaturización de los aparatos electrónicos.

La invención del láser, cuyo principio se basó en un mecanismo que Einstein propuso en 1917 para explicar la distribución de radiación encontrada por Planck en 1900 y mencionar algunas de sus aplicaciones.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 157 de 181

La fotónica, o sea la transmisión de señales, ahora por medio de ondas electromagnéticas y usando fibras ópticas.

Breve la introducción y aplicaciones de la electricidad en México.

Por último, capítulo indicar algunos de los avances que se están dando en la actualidad, así como las tendencias hacia el futuro.

Todo ello permitirá adquirir será una introducción a la asignatura para proporcionar un panorama general de lo que es la electricidad y el magnetismo, la relación que tienen los avances tecnológicos y el “hacer ciencia”, y como ello ha impactado en la forma de vida que tenemos.

Después de esta introducción a la electricidad y magnetismo se abordan la electrostática: cargas eléctricas, ley de Coulomb, estructura eléctrica de la materia, conductores y dieléctricos. Conceptos de campo y potencial electrostático, energía electrostática. Capacitancia, Corrientes eléctricas,

resistencia; ley de Ohm de Kirchhoff; fenómenos magnéticos y ley de Ampere. Materiales magnéticos.

Campos que varían con el tiempo y ley de inducción de Faraday. Circuitos eléctricos básicos.


A continuación, se abordan los conceptos, leyes y principios fundamentales de la electrostática la existencia de las cargas eléctricas positiva y negativa, la ley coulomb de atracción entre cargas y la diferencia de potencial.

Se sugiere una actividad integradora: la elaboración de un proyecto de aplicación de la electricidad y magnetismo, a partir de la tercera unidad, para realizarla paulatinamente y concluirla en la última unidad de forma que al alumno le permita aplicar los conceptos estudiados. Esto permite dar un cierre a la materia mostrándola como útil por sí misma en el desempeño profesional, independientemente de la utilidad que representa en el tratamiento de temas en materias posteriores.

El enfoque sugerido para la materia requiere que las actividades prácticas promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: identificación, manejo y control de variables y datos relevantes; planteamiento de hipótesis; trabajo en equipo; asimismo, propicien procesos intelectuales como inducción-deducción y análisis-síntesis con la intención de generar una actividad intelectual compleja; Por estas razones varias de las actividades prácticas son previas al tratamiento teórico de los temas, para que sean sino una oportunidad para conceptualizar a partir de lo observado. En éstas, es conveniente que el profesor busque sólo guiar a sus alumnos para que ellos hagan la elección de las variables a controlar y registrar. Para que aprendan a planificar.

En la lista de actividades de aprendizaje, se sugieren las necesarias para hacer más significativo y efectivo el aprendizaje. Algunas pueden hacerse como actividad extra clase y comenzar el tratamiento en clase a partir de la discusión de los resultados de las observaciones. Se busca partir de experiencias concretas, cotidianas, para que el estudiante se acostumbre a reconocer los fenómenos físicos en su alrededor y no sólo se hable de ellos en el aula. Es importante ofrecer escenarios distintos, ya sean construidos, artificiales, virtuales o naturales. En las actividades de aprendizaje sugeridas, generalmente se propone la formalización de los conceptos a partir de experiencias concretas; se busca que el alumno tenga el primer contacto con el concepto en forma concreta y sea a través de la observación, la reflexión y la discusión que se dé la formalización; la resolución de problemas se hará después de este proceso. Esta resolución de problemas no se especifica en la descripción de actividades, por ser más familiar en el desarrollo de cualquier curso. Pero se sugiere que se diseñen problemas con datos faltantes o sobrantes de manera que el alumno se ejercite en la identificación de datos relevantes y elaboración de supuestos.

En el transcurso de las actividades programadas es muy importante que el estudiante aprenda a valorar las actividades que lleva a cabo y entienda que está construyendo su hacer futuro y en consecuencia actúe de una manera profesional; de igual manera, aprecie la importancia del conocimiento y los hábitos de trabajo; desarrolle la precisión y la curiosidad, la puntualidad, el entusiasmo y el interés, la tenacidad, la flexibilidad y la autonomía.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 158 de 181

Es necesario que el profesor ponga atención y cuidado en estos aspectos en el desarrollo de las actividades de aprendizaje de esta asignatura.

Intención didáctica.

La finalidad de esta asignatura es desarrollar en el alumno las competencias para: Identificar y explicar fenómenos de naturaleza eléctrica y/o magnética para resolver problemas relacionados, mediante el uso de los principios y leyes fundamentales de la electricidad y el magnetismo.

Usar adecuadamente los instrumentos experimentales básicos: multímetro, osciloscopio, fuente de voltaje de c.c., bancos de experimentos y tablilla de experimentos (proto-board), así como el uso de algún software de simulación y la elaboración de tablas de circuito impreso PCB.

La interpretación y aplicación de las características de los elementos básicos de los circuitos eléctricos: resistencia, capacitancia e inductancia.


Formular, gestionar y evaluar proyectos de ingeniería relacionados con sistemas y dispositivos en el área electromecánica, proponiendo soluciones con tecnologías de vanguardia, en el marco del desarrollo sustentable.

Ejercer actitudes de liderazgo, trabajo en grupo para la toma de decisiones con sentido ético profesional.

Proporciona las habilidades necesarias para desarrollar la capacidad de análisis de variables, parámetros y leyes fundamentales para el estudio de fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.

3. Competencia de la asignatura


- Aplica las leyes del electromagnetismo con el fin de poder distinguir y predecir, el comportamiento de elementos eléctricos básicos en circuitos, fundamentado dicho estudio con el análisis y solución de problemas en donde intervengan fenómenos electromagnéticos.
- Comprende los principios de funcionamiento de elementos y dispositivos eléctricos y electromagnéticos.
- Conoce y aplica las leyes y conceptos fundamentales de la Electricidad y Magnetismo.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
		Revisión: 0
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Página 159 de 181


4. Análisis por competencias específicas

Competencia No. 1	Descripción: ELECTROSTÁTICA
1.1	Resuelve problemas relacionados con los conceptos de carga eléctrica, campo eléctrico y diferencia de potencial.
1.2	Demuestra prácticamente la existencia de las cargas eléctricas, el campo eléctrico, la diferencia de potencial, las líneas de campo.
1.3	Describe el significado de la ley de Coulomb.


TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
ELECTROSTÁTICA 1.1 Introducción histórica del Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología”. 1.2 Definición de electrostática 1.3 La carga eléctrica y sus propiedades. 1.4 Aislantes, conductores, semiconductores y superconductores. 1.5 Ley de Coulomb. 1.6 Ley de Gauss y sus aplicaciones 1.7 Definición de potencial eléctrico 1.8 Calculo de potencial eléctrico.	- Trabajo en pequeños grupos para la elaboración grupal de una línea de tiempo que sirva como un recorrido histórico de electromagnetismo: - Debate “¿quién es el responsable?” el conocimiento científico de la tecnología o la tecnología del conocimiento científico -Análisis de casos a partir de un problemario fuerza de atracción entre cargas, campo eléctrico, y diferencia de potencial. -Análisis del videomuseo2	<ul style="list-style-type: none"> Propiciar, en el estudiante, el desarrollo de actividades intelectuales de inducción-deducción y análisis-síntesis, las cuales lo encaminan hacia la investigación, la aplicación de conocimientos y la solución de problemas. Propiciar actividades de búsqueda, selección y análisis de información en distintas fuentes. Propiciar el uso de las nuevas tecnologías en el 	Competencias instrumentales. <ul style="list-style-type: none"> Capacidad de análisis y síntesis. Capacidad de organizar y planificar. Comunicación oral y escrita. Habilidades básicas de manejo de la computadora. Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. 	10-5

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0 Página 160 de 181

<p>1.9 Diferencia de potencial 1.10 Aplicaciones</p>	<p>-Actividad integradora: espacio de retroalimentación LO QUE APRENDI: cuestionario</p>	<p>desarrollo de los contenidos de la asignatura.</p> <ul style="list-style-type: none"> Fomentar actividades grupales que propicien la comunicación, el intercambio argumentado de ideas, la reflexión, la integración y la colaboración de y entre los estudiantes. Llevar a cabo actividades prácticas que promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: observación, identificación manejo y control de variables y datos relevantes, planteamiento de hipótesis, de trabajo en equipo 	<ul style="list-style-type: none"> Solución de problemas. Toma de decisiones. <p>Competencias interpersonales.</p> <ul style="list-style-type: none"> Capacidad crítica y autocrítica. Trabajo en equipo. Habilidades interpersonales. <p>Competencias sistémicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. Habilidades de investigación. Capacidad de aprender. Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad). Habilidad para trabajar en forma autónoma. Búsqueda del logro. 	
INDICADORES DE ALCANCE			VALOR DEL INDICADOR	


	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 161 de 181

<p>Cumple al menos con cinco de los siguientes indicadores:</p> <p>A) Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio.</p> <p>B) Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p> <p>C) Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p> <p>D) Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, ético, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc., para sustentar su punto de vista.</p> <p>E) Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p> <p>F) Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor (a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	95-100
Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 162 de 181

Niveles de desempeño:

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia alcanzada	Excelente	A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	95-100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 163 de 181

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0%	0	0	0	0	0	0	Prueba objetiva
Mapa conceptual	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Presentación electrónica	50	10	10	10	10	10	0	Rúbrica
Evaluación de conocimientos	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Asistencia	10	10	0	0	0	0	0	Lista de cotejo
	Total 100	28	18	18	18	18	0	

Competencia No. 2

Descripción: CAPACITANCIA

2.1

Conoce el concepto de capacitancia y sus aplicaciones en circuitos eléctricos mixtos


2.2

Conoce la construcción de un capacitor y sus propiedades.

2.3

Resuelve problemas de capacitancia

TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
CAPACITANCIA 2.1 Definición de capacitancia 2.2 Capacitor de placas paralelas 2.3 Capacitor cilíndrico. 2.4 Dieléctricos. 2.5 Capacitores en serie y paralelo	- Definir los conceptos de capacitor y capacitancia empleando dibujos y ejemplos prácticos. - Analizar la construcción de un capacitor de placas paralelas y cilíndricas sin dieléctrico y con dieléctrico.	- Propiciar actividades de metacognición, ante la ejecución de una actividad, señalar o identificar el tipo de proceso intelectual que se realizó: una identificación de patrones, un análisis, una síntesis, la creación de un heurístico, etc.	Competencias genéricas: Competencias instrumentales. <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Capacidad de organizar y planificar. • Comunicación oral y escrita. 	10-5

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0 Página 164 de 181

<p>2.6 Capacitores serie – paralelo. 2.7 Energía almacenada en un capacitor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar conexiones de capacitores en serie y paralelo, utilizando dibujos en clase y complementarlos con prácticas de laboratorio. - Calcular la energía almacenada por un capacitor e investigar el uso de esta energía en las aplicaciones y efectos en los aparatos eléctricos. - Interpretar la ecuación diferencial de un circuito RC. 	<ul style="list-style-type: none"> · Propiciar actividades de búsqueda, selección y análisis de información en distintas fuentes. · Observar y analizar fenómenos y problemáticas propias del campo ocupacional. · Relacionar los contenidos de esta asignatura con las demás del plan de estudios a las que ésta da soporte para desarrollar una visión interdisciplinaria en el estudiante. · Propiciar el desarrollo de capacidades intelectuales relacionadas con la lectura, la escritura y la expresión oral. · Propiciar el desarrollo de actividades intelectuales de inducción-deducción y análisis-síntesis, que encaminen hacia la investigación. · Propiciar el uso de las nuevas tecnologías en el desarrollo de la asignatura (procesador de texto, hoja de cálculo, base de datos, e Internet). 	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades básicas de manejo de la computadora. • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. • Solución de problemas. • Toma de decisiones. <p>Competencias interpersonales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica. • Trabajo en equipo. • Habilidades interpersonales. <p>Competencias sistémicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. • Habilidades de investigación. • Capacidad de aprender. • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad). • Habilidad para trabajar en forma autónoma. • Búsqueda del logro. 	
--	--	--	---	--



Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales


Código: TecNM-AC-PO-003-02

Revisión: 0

Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1

Página 165 de 181


INDICADORES DE ALCANCE	VALOR DEL INDICADOR
<p>Cumple al menos con cinco de los siguientes indicadores:</p> <p>G) Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio.</p> <p>H) Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p> <p>I) Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p> <p>J) Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, ético, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc., para sustentar su punto de vista.</p> <p>K) Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p> <p>L) Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor (a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	<p>95-100</p>
<p>Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente</p>	<p>85-94</p>
<p>Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente</p>	<p>75-84</p>
<p>Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente</p>	<p>70-74</p>

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 166 de 181

No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)
--	----------------------

Niveles de desempeño:

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia alcanzada	Excelente	A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	95-100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 167 de 181

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Presentación electrónica	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Encuesta	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Proyecto	30	5	5	5	5	5	5	Rúbrica
Evaluación de conocimientos	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Asistencia	10	10	0	0	0	0	0	Lista cotejo.
Total	100	27	17	17	17	17	5	

Competencia No. 3

Descripción: ELECTRODINÁMICA

3.1

Resuelve y construye circuitos con resistencias y fuentes de voltaje de cc aplicando las leyes de Ohm y Kirchoff (mallas y nodos) para calcular, voltajes y corrientes.

TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
ELECTRODINÁMICA 3.1 Corriente eléctrica. 3.2 Fuentes de fuerza electromotriz: pilas y baterías. 3.3 Resistencia. 3.3.1 Resistividad 3.3.2 Factores que afectan la resistividad.	- Armar circuitos en serie y paralelo para medir voltajes y corriente Discutir sobre los resultados en un caso y el otro y concluir. - Investigar el código de colores para resistencias y obtener valores de diversas resistencias, y comprobar con el óhmetro	• Propiciar, en el estudiante, el desarrollo de actividades intelectuales de inducción-deducción y análisis-síntesis, las cuales lo encaminan hacia la investigación, la aplicación de conocimientos y la solución de problemas.	Competencias genéricas: Competencias instrumentales. <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Capacidad de organizar y planificar. • Comunicación oral y escrita. 	10-5



Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales

Código: TecNM-AC-PO-003-02

Revisión: 0

Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1

Página 168 de 181

<p>3.3.3 Código de colores. 3.3.4 Resistencia en serie y en paralelo. 3.4 Ley de Ohm 3.5 Leyes de Kirchhoff 3.6 Divisor de corriente y de voltaje 3.7 Energía eléctrica y potencia. 3.7.1 Ley de Joule 3.7.2 Potencia Eléctrica 3.8 Elección e inicio del proyecto.</p>	<p>- Investigar las leyes Kirchhoff para aplicar las leyes a la resolución de circuitos - Resolución de problemario.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar actividades de búsqueda, selección y análisis de información en distintas fuentes. • Propiciar el uso de las nuevas tecnologías en el desarrollo de los contenidos de la asignatura. • Fomentar actividades grupales que propicien la comunicación, el intercambio argumentado de ideas, la reflexión, la integración y la colaboración de y entre los estudiantes. • Llevar a cabo actividades prácticas que promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: observación, identificación manejo y control de variables y datos relevantes, planteamiento de hipótesis, de trabajo en equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades básicas de manejo de la computadora. • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. • Solución de problemas. • Toma de decisiones. <p>Competencias interpersonales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica. • Trabajo en equipo. • Habilidades interpersonales. <p>Competencias sistémicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. • Habilidades de investigación. • Capacidad de aprender. • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad). • Habilidad para trabajar en forma autónoma. • Búsqueda del logro. 	
---	--	---	---	--



Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales


Código: TecNM-AC-PO-003-02

Revisión: 0

Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1


Página 169 de 181

INDICADORES DE ALCANCE	VALOR DEL INDICADOR
<p>A) Cumple al menos con cinco de los siguientes indicadores:</p> <p>B) Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio.</p> <p>C) Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p> <p>D) Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p> <p>E) Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, ético, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc., para sustentar su punto de vista.</p> <p>F) Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p> <p>G) Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor (a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	<p>95-100</p>
Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 170 de 181

Niveles de desempeño:

DESEMPEÑO		NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia alcanzada		Excelente	<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.</p> <p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.</p> <p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).</p> <p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio).</p> <p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.</p> <p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.</p>	95-100
		Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
		Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
		Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
Competencia no alcanzada		Insuficiente	No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 171 de 181

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Video (presentación)	40	7	7	7	7	6	6	Rúbrica
Encuesta	30	5	5	5	5	5	5	Rúbrica
Evaluación de conocimientos	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Asistencia	10	10	0	0	0	0	0	Lista de cotejo
	Total 100	26	16	16	16	11	11	


Competencia No. 4

Descripción: CAMPO MAGNÉTICO

4.1

Conoce los conceptos, efectos y aplicaciones del campo magnético, así como las leyes que lo rigen.

TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
CAMPO MAGNÉTICO 4.1 Conceptos: Magnetismo, campo magnético y flujo magnético 4.2 Materiales magnéticos y sus propiedades. Histéresis 4.3 Generación de campos magnéticos. Ley de Biot-Savart	<ul style="list-style-type: none"> - Estudiar los conceptos de campo magnético y flujo magnético para realizar el cálculo de momento sobre una espira. - Investigar el efecto hall, así como el funcionamiento del Ciclotrón. - Utilizar dibujos para entender la Ley de Biot-Savart y aplicarlo a cálculos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar, en el estudiante, el desarrollo de actividades intelectuales de inducción-deducción y análisis-síntesis, las cuales lo encaminan hacia la investigación, la aplicación de conocimientos y la solución de problemas. • Propiciar actividades de búsqueda, selección y 	Competencias genéricas: Competencias instrumentales. <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Capacidad de organizar y planificar. • Comunicación oral y escrita. 	10-5

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0 Página 172 de 181

<p>4.4 Fuerza magnética sobre una carga.</p> <p>4.5 Fuerza magnética y par sobre un conductor que conduce corriente.</p> <p>4.6 Fuerza magnética entre conductores paralelos.</p> <p>4.7 Ley de Faraday</p> <p>4.8 Ley de Lenz</p> <p>4.9 Introducción a Leyes de Maxwell</p> <p>4.10 Seguimiento al proyecto seleccionado</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Discutir en grupo la ley de Ampere y sus aplicaciones y conocer la fuerza de atracción o repulsión entre conductores paralelos. - Investigar las aplicaciones de las Leyes de Lenz y Faraday en los equipos eléctricos. - Definir las ecuaciones de Maxwell 	<p>análisis de información en distintas fuentes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Propiciar el uso de las nuevas tecnologías en el desarrollo de los contenidos de la asignatura. • Fomentar actividades grupales que propicien la comunicación, el intercambio argumentado de ideas, la reflexión, la integración y la colaboración de y entre los estudiantes. • Llevar a cabo actividades prácticas que promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: observación, identificación manejo y control de variables y datos relevantes, planteamiento de hipótesis, de trabajo en equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades básicas de manejo de la computadora. • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. • Solución de problemas. • Toma de decisiones. <p>Competencias interpersonales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica. • Trabajo en equipo. • Habilidades interpersonales. <p>Competencias sistémicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. • Habilidades de investigación. • Capacidad de aprender. • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad). • Habilidad para trabajar en forma autónoma. • Búsqueda del logro. 	
--	---	--	---	--



Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales


Código: TecNM-AC-PO-003-02

Revisión: 0

Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1


Página 173 de 181

INDICADORES DE ALCANCE	VALOR DEL INDICADOR
<p>A) Cumple al menos con cinco de los siguientes indicadores:</p> <p>B) Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio.</p> <p>C) Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p> <p>D) Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p> <p>E) Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, ético, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc., para sustentar su punto de vista.</p> <p>F) Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p> <p>G) Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor (a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	<p>95-100</p>
Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 174 de 181

Niveles de desempeño:

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia alcanzada	Excelente	<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.</p> <p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.</p> <p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).</p> <p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio).</p> <p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.</p> <p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.</p>	95-100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 175 de 181

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Video (Presentación)	40	7	7	7	7	7	5	Rúbrica
Encuesta	30	5	5	5	5	5	5	Rúbrica
Evaluación de conocimientos	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Asistencia	10	10	0	0	0	0	0	Lista de cotejo
	Total 100	27	17	17	17	12	10	


Competencia No. 5

Descripción: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA


5.1
5.2

Comprende el concepto de inductancia y su efecto en las máquinas eléctricas.
Calcula la fuerza electromotriz inducida y saber aplicarla a diferentes problemas.


TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA 5.1 Definición de inductancia 5.2 Enlaces de flujo 5.3 Energía asociada al campo magnético 5.4 Inductancia mutua 5.5 Conclusión y revisión del proyecto Seleccionado	<ul style="list-style-type: none"> - Definir y comprender el concepto de inductancia. - Conocer y aplicar la regla de Fleming (regla de la mano derecha) - Analizar los enlaces de flujo entre bobinas y la energía asociada al campo magnético y la inductancia mutua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar, en el estudiante, el desarrollo de actividades intelectuales de inducción-deducción y análisis-síntesis, las cuales lo encaminan hacia la investigación, la aplicación de conocimientos y la solución de problemas. 	Competencias genéricas: Competencias instrumentales. <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Capacidad de organizar y planificar. • Comunicación oral y escrita. 	10-5

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 176 de 181

	<p>- Analizar problemas en donde se calcule la FEM inducida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar actividades de búsqueda, selección y análisis de información en distintas fuentes. • Propiciar el uso de las nuevas tecnologías en el desarrollo de los contenidos de la asignatura. • Fomentar actividades grupales que propicien la comunicación, el intercambio argumentado de ideas, la reflexión, la integración y la colaboración de y entre los estudiantes. • Llevar a cabo actividades prácticas que promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: observación, identificación manejo y control de variables y datos relevantes, planteamiento de hipótesis, de trabajo en equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades básicas de manejo de la computadora. • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. • Solución de problemas. • Toma de decisiones. <p>Competencias interpersonales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica. • Trabajo en equipo. • Habilidades interpersonales. <p>Competencias sistémicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. • Habilidades de investigación. • Capacidad de aprender. • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad). • Habilidad para trabajar en forma autónoma. • Búsqueda del logro. 	
--	--	---	---	--

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 177 de 181


INDICADORES DE ALCANCE	VALOR DEL INDICADOR
<p>Cumple al menos con cinco de los siguientes indicadores:</p> <p>A) Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio.</p> <p>B) Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p> <p>C) Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p> <p>D) Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, ético, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc., para sustentar su punto de vista.</p> <p>E) Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p> <p>F) Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor (a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	95-100
Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 178 de 181

	(no alcanzada)
--	----------------

Niveles de desempeño:

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia alcanzada	Excelente	<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.</p> <p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.</p> <p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).</p> <p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de tecnologías de la información, estableciendo previamente un criterio).</p> <p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.</p> <p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.</p>	95-100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en desempeño docente	85-94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en desempeño docente	75-84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en desempeño docente	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	No se cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimentales y actitudinales de los indicadores definidos en el desempeño excelente.	NA (no alcanzada)

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 179 de 181

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Presentación electrónica.	30	5	5	5	5	5	5	Rúbrica
Proyecto	30	5	5	5	5	5	5	Rúbrica
Evaluación de conocimientos	20	4	4	4	4	4	0	Rúbrica
Lista de asistencia	10	10	0	0	0	0	0	Lista de cotejo
	Total 100	25	15	15	15	15	15	

Fuentes de información

- Boylestad, R. (2005) Electricidad, Electrónica y Electromagnetismo. (1ed), México: Trillas
- SEARS, F. (2005). Física universitaria volumen 2. (11 ed.). México: Pearson Educación.
- Serrano, D.; García, V. (2001). Electricidad y Magnetismo. Estrategias para la resolución de problemas y aplicaciones. México: Pearson Educación.
- M. Lea, Susan. Burke, John Robert. (1999). Física Vol. II. La naturaleza de las cosas. México: International Thomson editores, S. A. de C. V.
- Tipler, P; Mosca, G. (2003). Física para la ciencia y la tecnología (5 ed.). España: Reverté, S. A.
- Jewet, S. (2004), Física II. Texto basado en cálculo. (3 ed.). México: International Thomson editores.
- Serway, R. (2005), Física para ciencias e ingenierías, (6 ed.). México: International Thomson editores.

Apoyos didácticos:

- Computadora.
- Proyector.
- Marcadores.
- Calculadora



Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales

Código: TecNM-AC-PO-003-02

Revisión: 0

Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1

Página 180 de 181

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T.P.	ED	EFn	EFn	ES	EFn	EFn	ES	EFn	EFn	ES	EFn	EFn	ES	EFn	EFn	ES
T.R.																
S.D.	1er. Seguimiento					2do. Seguimiento				3er. Seguimiento			Reporte Final			
	20 septiembre 2024					18 octubre 2024				15 noviembre 2024			10 enero 2025			

ED = Evaluación diagnóstica. EF n = Evaluación formativa. ES = Evaluación sumativa.

TP= Tiempo planeado TR=Tiempo real SD = Seguimiento departamental

Fecha de elaboración: 23/AGO/2024

M. en C. Tomás Muñiz Vera

Mtra. María Magdalena Vejar Chávez
Jefe del Departamento de Metalmecánica

CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Ciudad de México, a 31/08/2024

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.
PRESENTE

Bajo protesta de decir verdad, Tomás Muñiz Vera, personal docente adscrito al Instituto Tecnológico de la Costa Grande del Tecnológico Nacional de México, manifiesto que en cumplimiento de mis actividades relacionadas con el Año Sabático elaboré la obra titulada "Apuntes de la Asignatura Electricidad y Magnetismo", Clave Oficial EMC-1011 del Plan de Estudios de la Carrera de Ingeniería Electromecánica IEME-2010-210.

Con base en lo anterior, y con fundamento en los artículos 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y 46 de su Reglamento, reconozco que el Tecnológico Nacional de México es titular de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponden las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección, conservando el derecho a figurar como autor.

Asimismo, respondo por la autoría y originalidad de la citada obra; y relevo de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que considere que con esta obra es afectado en alguno de los derechos protegidos por la Ley en cita, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas.

A T E N T A M E N T E

Tomás Muñiz Vera
Docente del Depto. de Metal-Mecánica
Instituto Tecnológico de la Costa Grande