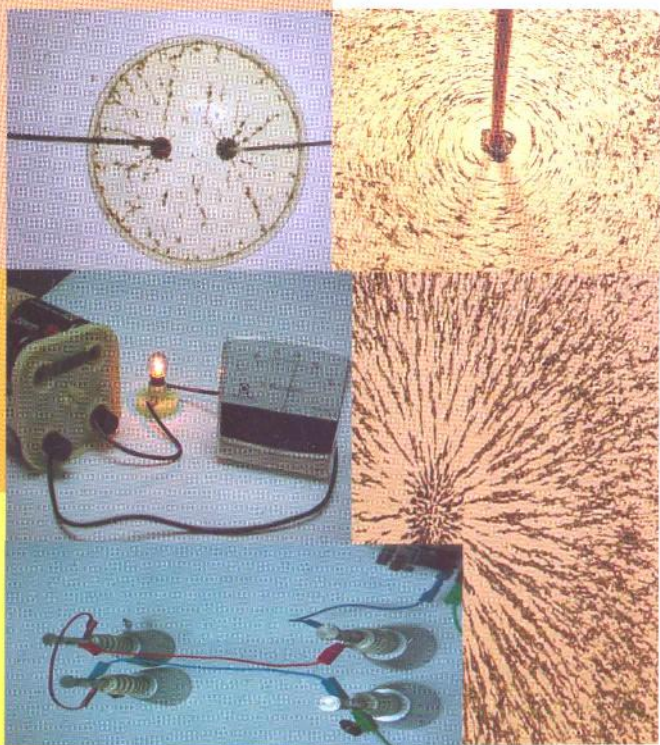


Física

Introducción a la

Electricidad y Magnetismo

Prof. Joaquín Castillo
Prof. Pedro González
Prof. Beny Richter
Prof. Rafael Mata



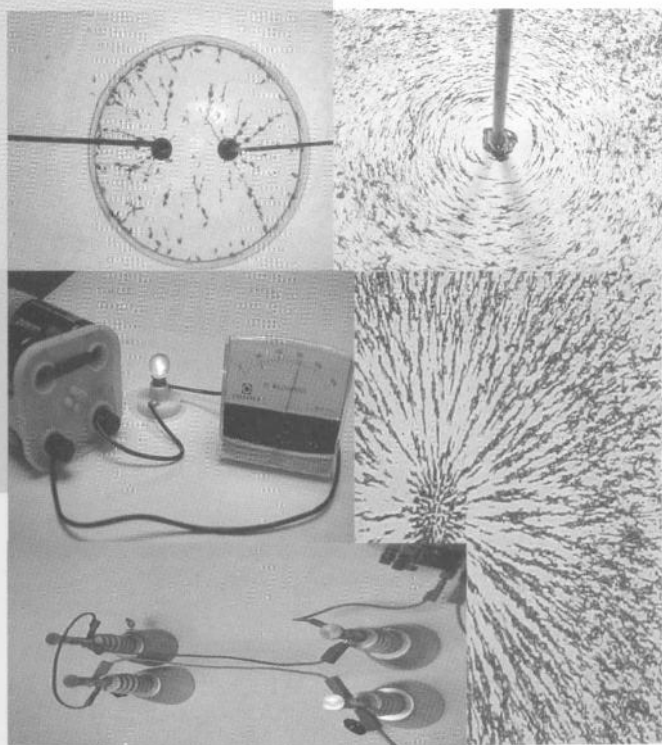
CARACAS
2015

Física

Introducción a la

Electricidad y Magnetismo

Prof. Joaquín Castillo
Prof. Pedro González
Prof. Beny Richter
Prof. Rafael Mata



CARACAS
2015

Agradecimiento

- *A la prof. Flor Arnal, cuyo entusiasmo juvenil y aportes certeros a la hora de revisar y editar, hacen posible la culminación de esta obra.*

Presentación

El texto que presentamos surge de un proceso de indagación, discusión y reestructuración de conceptos e ideas del ámbito del Electromagnetismo. Se aspira que esta propuesta didáctica este dirigida a personas que se inician en estudios sobre la electricidad y magnetismo

Al escribir el libro encontramos enormes dificultades que, sin duda, quedan reflejadas en sus limitaciones y deficiencias.

Examinar las ideas centrales de la Teoría del Campo sin usar la matemática más pertinente fue, tal vez, el mayor escollo. Así mismo, no fue fácil introducir algunos elementos de simetría necesarios para la comprensión del condicionamiento del espacio por la presencia de cargas y corrientes estacionarias.

En concreto, el capítulo I focaliza la discusión en la Energía Eléctrica (EE) y su distribución en circuitos sencillos. El Principio de Conservación de la Energía sirve de guía para la exposición, en el entendido que la potencia suministrada a un circuito equivale a la consumida o disipada en el mismo; idea ésta que extendemos a los circuitos domiciliarios mediante los conceptos de potencia, intensidad eficaz (I_{ef}) y voltaje eficaz (V_{ef}) en una corriente alterna (C.A).

En los capítulos II y III se desarrolla el concepto de campo a partir de las ideas primarias de Michael Faraday y de la observación de la configuración especial que adquieren las semillas de césped próximas a cargas eléctricas o las limaduras de hierro cercanas a imanes o corrientes eléctricas.

Además, la exposición se guía, en parte, por la idea de R. Feynmann, en el sentido de resaltar la importancia de los conceptos de “flujo” y “circulación” de un campo vectorial cuando se trata de interpretar la simetría esférica del campo eléctrico E producido por una carga estacionaria y la simetría cilíndrica que rodea a una corriente no dependiente del tiempo.

Finalmente, conscientes del contraste entre la geometría bidimensional de las hojas de texto y la tridimensionalidad de los fenómenos electromagnéticos. Se hace un esfuerzo en términos de dibujos y fotografías para ayudar al lector-estudiante en su proceso de aprendizaje.

Ojalá que este texto provoque su crítica constructiva que estaríamos dispuestos a recibir y tomar en cuenta para mejorar futuras ediciones.

Núcleo de Investigación de Educación en Física (NIEF)

Índice

	pp
Capítulo I	13
Introducción a la Energía Eléctrica	13
Primeras Ideas Sobre Conceptos Vinculados con la Energía Eléctrica	16
Diferencia de Potencial Eléctrico	16
Corriente Eléctrica	18
Campo Eléctrico	18
Intensidad de la Corriente Eléctrica	21
Medida de la Corriente Eléctrica	22
Circuitos Eléctricos de Corriente Continua	25
Resistencia Eléctrica: Ley de Ohm	25
Fuerza Electromotriz (fem) de una Batería o Pila	29
Diferencia de Potencial	30
Potencia Eléctrica	31
Potencia y Trabajo	31
Costo de la Energía Eléctrica	32
Disipación Térmica en los Conductores: Ley de Joule	32
Los Circuitos Eléctricos y la Conservación de la Energía	34
Asociaciones de Resistencias	35
Resistencia de Combinación en Serie	35
Resistencia de Combinación en Derivación	36
Pilas y Baterías en Serie	37
Pilas y Batería en Derivación	38
Reglas de kirchhoff	38
Regla de los nudos	38
Regla de las Mallas	38
Procedimiento para Aplicar las reglas de Kirchhoff	39
Actividades de Reconstrucción del Conocimiento	40
Ejercicios Resueltos	40
Problemas Propuestos	46

La Red Domiciliaria de Corriente Alterna	48
Elementos de corriente alterna (CA)	48
Voltajes o Tensión Eficaz de la CA	48
Potencia Nominal y Potencia Efectiva	50
Ejercicios resueltos	51
Resumen de Capítulo	53
Anexos	57
1) Un Modelo Didáctico de Corriente Eléctrica	57
2) Velocidad Media o Térmica de los Electrones Libres de un Metal	61
3) Rapidez de Arrastre de la Nube Electrónica	62
Capítulo II	65
Campo Electrostático. Flujo del Campo. Ley de Gauss. Potencial Eléctrico	65
Experimento de Oersted	65
Campo Eléctrico	68
a) Acción a Distancia	68
La interacción Coulombiana como acción a distancia	68
b) El Campo Electrostático y la Fuerza de Interacción entre Cargas	69
Simetría Esférica y Campo Electrostático	70
Ley de Gauss	70
Ley de Gauss: Flujo del Campo Electrostático	71
Características de \vec{E}	73
Características del $\Delta\vec{S}$	73
Definición de Flujo	74
Análisis de la Ley de Gauss	75
Ejemplos de Aplicaciones de la Ley de Gauss	76
Aplicaciones más Complejas	77
Intensidad del Campo Eléctrico a una Distancia R , de una Varilla muy Larga Cargada Uniformemente (Línea muy larga de carga).	77

Simetría Cilíndrica	79
Campo de una Carga Distribuida en una Placa Plana Delgada muy Amplia	82
Ley de Gauss y la Ley de Coulomb. Relación entre k la Constante de Coulomb y la Permitividad del Espacio ϵ_0	84
Unidades De \vec{E}_p y Cálculo de ϵ_0	85
Ley de Gauss	85
Potencial de un Campo Electrostático	86
Energía Potencial (E_p)	86
Potencial V_p en un Punto (p) del Campo Electrostático	87
Superficies Equipotenciales	88
Diferencia de Potencial	88
Análisis del Concepto de Potencial del Campo Electrostático	89
Cuestionario de Revisión de Conocimiento Potencial Eléctrico y Campo Eléctrico	91
Resumen de Capítulo	93
Ejercicios Propuestos	95
Capítulo III	97
Campo Magnético: Circulación. Ley de Ampere	97
Campo Magnético Terrestre	97
Representación de las Corrientes y sus Campos	100
Campo Magnético Creado por una Corriente Estacionaria. Vector Inducción Magnética \vec{B} . Dirección y Sentido de \vec{B}	101
Circulación de un Campo Magnético. Ley de Ampere	101
Ampliación y Análisis de la Ley de Ampere	104
Aplicaciones de la Ley de Ampere	105
Campo Magnético en la Parte Central de un Solenoide Largo con Relación a su Radio	105

Obtención del Vector Inducción Magnética B en la Región Central Interna del Solenoide	106
Los Experimentos de Ampere	107
Fuerza entre dos Corrientes Estacionarias Paralelas y la Ley de Ampere	109
Fuerza sobre una Corriente Dentro de un Campo Magnético	110
Determinación Experimental de μ_o	112
Movimiento de Cargas Eléctricas en Campos Magnéticos Uniformes	114
Trabajo Realizado por la Fuerza Magnética sobre una Carga Puntual (q) con Velocidad (\vec{v}) dentro de un Campo Magnético Uniforme (\vec{B})	115
Valor y Unidades de la Constante Magnética k_m y de la Permeabilidad Magnética μ_o. Definición del Ampere	116
Resumen de Capítulo	117
Problemas Resueltos	119
Problemas Propuestos	121
Apéndice	123
Referencias	125

No es exagerado señalar que el grado de desarrollo tecnológico de la sociedad está fuertemente asociado con la producción y manejo de la corriente eléctrica. Si bien pudiese decirse que no es fácil dar un concepto preciso de la corriente eléctrica, en cambio, la ciencia y la técnica sí conocen las condiciones requeridas para que ésta se establezca, y ha sabido darle utilidad a los efectos que produce, tales como luz, energía térmica y trabajo mecánico.

Para ayudar a que cada estudiante construya su propia noción de corriente eléctrica, a continuación se presenta información sobre sus características y propiedades, así como algunos modelos sobre su origen, naturaleza y atributos. Luego, fundamentados en el principio de conservación de la carga y el principio de conservación de la energía, son analizadas las leyes y modelos que permiten describir y explicar las características y propiedades de los circuitos resistivos de corriente continua, así como los procesos de transformación energética que tienen lugar en éstos.

Introducción a la Energía Eléctrica

Un día se usará el agua como combustible, y el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, empleados por separado o conjuntamente, suministrarán una fuente de energía inagotable...

Julio Verne "La isla Misteriosa"

La Energía es algo que no necesariamente vemos o experimentamos de forma directa; no es un fluido o sustancia, a pesar de que hace más de un centenar de años se consideraban algunas formas de energía como si fluyera de un objeto a otro. Según Arons (1970) usamos el término "energía" para denominar un constructo o combinación de símbolos que representan

números calculados de determinada manera y para el cual se ha encontrado que, teórica y experimentalmente, se mantiene constante en una gran variedad de fenómenos físicos. Este constructo, que es uno de los grandes descubrimientos acerca del comportamiento de la naturaleza, no es una simple definición; fue inventado como una idea útil para la descripción de algunas características de las regularidades y de los cambios físicos que el hombre ha observado a su alrededor y ha sido desarrollado a través la investigación y la experimentación.



Fig. 1.1

¿Qué ocurre si "se va la luz", como suele decirse? Sugerimos hacer una lista de servicios que fallan y pensar en cuan útil nos resulta o cómo se nos complicará la vida sin ellos.

Por ejemplo, en el ámbito de la Mecánica se ha observado que toda máquina que realiza un movimiento consume cierta cantidad de energía, pero en compensación produce efectos eléctricos, térmicos, o modifica la estructura de otros cuerpos. Esta cadena de transformaciones se rige por un principio universal de la naturaleza – LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA – y está en concordancia con todas las manifestaciones observadas. Físicos como Hermann Helmholtz (1821-1894), Roberto Mayer (1814-1878) y Jaime Joules (1818-1889) contribuyeron de forma determinante en el establecimiento del principio mencionado. Las pilas o baterías eléctricas son dispositivos (como los mostrados en la Fig. 1.1) que almacenan energía potencial eléctrica entre sus bornes; finalmente, al conectar la pila a un circuito se transforma, esa

energía almacenada, en otro tipo de energía –como luz y energía térmica– en concordancia con el principio referido. Las pilas o baterías no son las únicas fuentes de energía eléctrica, pues po-



Planta Hidroeléctrica

Fig. 1.2

energía almacenada, en otro tipo de energía –como luz y energía térmica– en concordancia con el principio referido. Las pilas o baterías no son las únicas fuentes de energía eléctrica, pues po-

demos obtenerla también a través de otras transformaciones de energías como por ejemplo en plantas hidroeléctricas (Fig. 1.2).

Al someter estos fenómenos de transformación a mediciones cuidadosas resulta que la cantidad de energía suministrada por la pila, o fuente, resulta igual a la cantidad de energía transformada en el circuito en otro tipo de energía. En todo caso se cumple el siguiente Principio: **La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.** En los sistemas naturales, cada vez que se observa la aparente aparición, o surgimiento, de una forma de energía, es seguro que ha ocurrido una transformación: la energía que aparentemente aparece proviene de la transformación de otra forma de energía; la energía que aparentemente desaparece, en realidad, se ha transformado en energía de otro tipo. Ejemplos:



Fig. 1.3

a- La energía disponible en los bornes de una pila, o batería, proviene de la energía de los enlaces atómicos de sus componentes Fig. 1.3

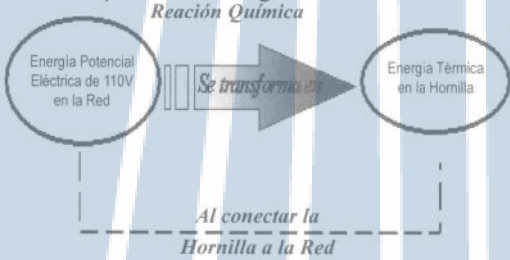


Fig. 1.4

b- La energía potencial eléctrica disponible en los terminales de la red eléctrica domiciliaria, se transforma en energía térmica en la hornilla de una cocina eléctrica (Fig. 1.4)

El hombre actual está inmerso en un ambiente tecno-científico complejo, lleno de máquinas y tecnemas que no sólo desafían la imaginación, sino que proporcionan bienestar y confort. Es suficiente mirar a nuestro alrededor para percibir la existencia de radios, televisores, computadores, teléfonos fijos y móviles, etc, todos productos del uso adecuado e inteligente del conocimiento sobre el electromagnetismo y la ingeniería afín.

Entre otras manifestaciones, la energía eléctrica se presenta en forma de **corriente eléctrica continua o alterna**. La primera, se obtiene usualmente de baterías, pilas secas o fuentes especiales con las cuales se mantienen en funcionamiento innumerables

aparatos (teléfonos móviles, radios, linternas, motor de arranque de los automóviles, entre otros), mientras que la corriente alterna, más multifuncional que la primera, se produce en generadores donde se transforma energía de otro tipo (hidráulica, eólica, mecánica, química) en energía eléctrica, tal como ocurre, por ejemplo, en las plantas hidroeléctricas o en usinas activadas con combustibles fósiles o nucleares.

Primeras Ideas sobre Conceptos Vinculados con la Energía Eléctrica

En las pilas se transforma energía química en energía eléctrica, entendida ésta como capacidad acumulada para generar efectos térmicos, luminosos, o motores en un circuito externo. Ligado a estas manifestaciones los científicos han creado un conjunto de conceptos, ideas y procedimientos necesarios no sólo para explicar el complejo mundo de la electricidad, sino que también para dar fundamento a la técnica e ingeniería. Así, en el entendido de que el aprendizaje es un proceso laborioso, complejo y progresivo, se inicia este texto con algunas nociones elementales sobre la corriente eléctrica y su distribución: intensidad de la corriente eléctrica, potencial y diferencia de potencial eléctrico, campo eléctrico y resistencias eléctricas en un hilo metálico.

a) *Diferencia de Potencial Eléctrico*

Es un hecho comprobado que en una pila, los iones (átomos con déficit o exceso de electrones en sus orbitas de valencia) positivos se acumulan en un electrodo (borne positivo) y los iones negativos en el otro electrodo (borne negativos); no obstante, tal distribución luce contradictoria, por cuanto las cargas positivas y negativas tienen la propiedad de atraerse. Sin pretender dar una respuesta definitiva a esta aparente contradicción, parece plausible pensar que las reacciones químicas dentro de la pila transforman suficiente energía como para realizar



En la gráfica se evidencia el movimiento de la esfera debido a la diferencia de energía potencial gravitacional del sistema (Tierra - Objeto) presente entre la azotea del edificio y el pavimento.

Fig. 1.5

el trabajo necesario para separar y mantener las cargas en los bornes respectivos.

Ahora bien, sin desdeñar el estudio minucioso de pilas y baterías, en esta sección nos interesa centrar la atención en las propiedades eléctricas causadas por la separación de cargas. Así, en primer lugar, aceptamos que tal separación en una pila produce una capacidad energética entre sus bornes, de alguna manera relacionada con la energía química almacenada entre sus enlaces interatómicos. Esta propiedad o **diferencia de potencial eléctrica** está ligada, como veremos, al concepto más inclusivo de campo eléctrico.

Para una mejor comprensión del nuevo término, se invita al lector a examinar la siguiente analogía entre la diferencia de potencial eléctrica y la diferencia de potencial gravitacional: En el estudio del campo gravitacional, a la superficie terrestre se le puede considerar como sistema de referencia y adjudicarle un potencial gravitacional cero, luego, para elevar una piedra (moverlo desde el punto "S" hasta "A" (Fig. 1.5) se necesita la acción de persona, animal o máquina que realice un trabajo mecánico; en esta condición se afirma que existe una **diferencia de potencial gravitacional** entre los puntos "S" y "A". La nueva configuración piedra-Tierra dota al sistema de una capacidad energética denominada, en la teoría del campo, **energía potencial gravitacional**. Como sabemos, la piedra caerá por sí sola desde el punto elevado debido a esta energía. De manera semejante, los electrones libres de un hilo conductor conectado a los electrodos de una pila se mueven de forma compleja desde el electrodo negativo hasta el electrodo positivo, poniendo de manifiesto la energía potencial eléctrica contenida en el campo. De alguna manera el movimiento de los electrones libres es comparable con la capacidad de movimiento adquirida por la piedra cuando cae desde una altura cualquiera a Tierra.

Curiosidades - Historia

Probablemente las primeras manifestaciones de la electricidad, fueron reportadas en el año de 1796 por el Anatomista italiano de Bolonia Luigi Galvani (1737 -1798) quien observo, que cuando se tocaban los nervios de las patas de rana con el escarpelo se generaba en ellas una contracción muscular, acción que en aquellos tiempos estaba asociadas a los choques de descargas eléctricas.

b) Corriente Eléctrica

Como fue señalado, al conectar los electrodos de una pila mediante un hilo metálico externo se induce una tendencia de movimiento en los electrones libres de éste, arrastrándolos de un electrodo al otro. Este movimiento de cargas a través del hilo metálico constituye lo que podríamos llamar en

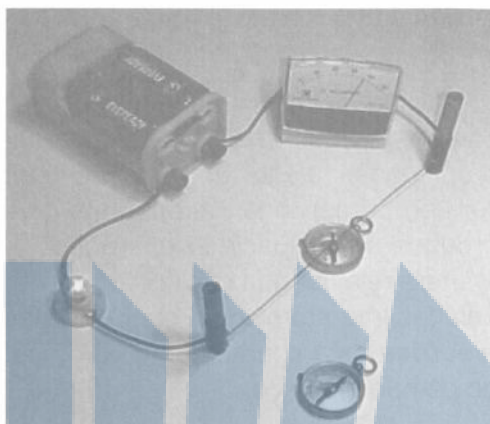


Fig. 1.6

Gráfico (magnético / termico -luminoso)

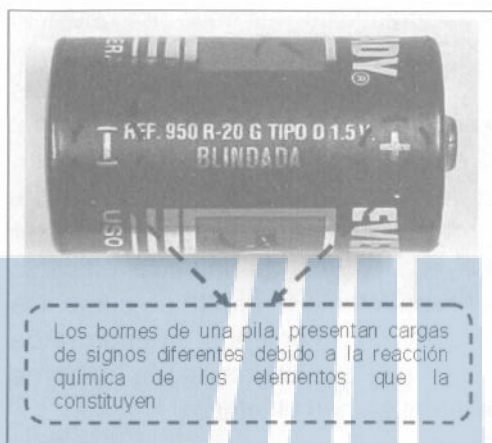
primera aproximación **corriente eléctrica**, la cual es una cualidad de las manifestaciones eléctricas atribuible a la diferencia de potencial eléctrico y a la características físicas de los conductores metálicos; es decir, que sin diferencia de potencial no se produciría corriente eléctrica alguna, tal como ocurre cuando intentamos utilizar un aparato cuyas pilas están descargadas (sin diferencia de potencial).

c) Campo Eléctrico

La capacidad energética presente en el circuito eléctrico mostrado en la Fig. 1.6 se manifiesta como luz y energía térmica en el bombillo, y altera la posición de la brújula cercana. Las primeras ideas sobre diferencia de potencial y corriente eléctrica han servido para, de alguna manera, iniciar la construcción de un sistema de conceptos relacionados con estos fenómenos, sobre todo el que tiene que ver con la disipación de energía térmica. Tales hechos también se vinculan con la manera como se extiende la influencia eléctrica en el material del conductor. ¿Qué ocurre a nivel microscópico? ¿Cómo pasar de la percepción de luz y calor a una explicación plausible de ello?

Cristales Metálicos y Conducción Eléctrica

En atención a las últimas teorías atómicas, si dispusiéramos de un átomo metálico aislado se mostraría eléctricamente neutro; la carga positiva de los protones del núcleo compen-



sería la carga negativa total de los electrones circundantes. Por ejemplo, en el átomo de cobre los veintinueve protones del núcleo están acompañados por veintinueve electrones. Por otra parte en un alambre metálico, constituido por inmenso número de átomos muy cercanos existen fuerzas de interacción, de origen

mecánico cuántico, que hacen que los átomos pierdan uno o dos electrones de sus orbitas más externas transformándose en iones positivos. Por su parte, los electrones liberados no consiguen agruparse y quedan vagando al azar. En este orden un metal, en una visión microscópica podría entenderse como una estructura cristalina consistente en redes tridimensionales de nudos iónicos positivo más o menos fijos, entre los cuales deambulan al azar con gran rapidez ininidad de electrones libres o "nube electrónica" no ligada a átomo alguno. La estabilidad del metal se explicaría entonces, por la atracción entre la carga positiva de la red iónica y la carga total negativa de la nube o "gas electrónico". Parece conveniente destacar que en el modelo del metal descrito, la gran mayoría de los electrones se mantienen ligados a los núcleos atómicos formando los iones, mientras que un número menor de ellos, no obstante inmenso, se moverían en casi todo el metal ocupando, según calculo indirecto y aproximado, el 85% del volumen total. También, para dar una idea aproximada de la conducción eléctrica en metales, conviene que a temperatura ambiente, y causado por ella, los iones metálicos vibran alrededor de puntos más o menos fijos, mientras que los electrones libre alcanzan velocidades medias asombrosas.

Con fines didácticos, se inicia este estudio refiriéndonos a la explicación clásica de conducción eléctrica en metales, que si bien no aclara todo, proporciona ideas sencillas asequibles a un lector novel. En un primer modelo explicativo sobre la corriente eléctrica aceptamos la idea de que si bien los trillones de electrones libres de

un conductor poseen una energía cinética que les hace deambular al azar entre los corazones iónicos del metal (energía asociada con la energía térmica) al momento de conectar el conductor a los bornes de la pila, los electrones libres adquieren una energía adicional de movimiento que se suma a la que ya tienen. En un proceso complicado que aun estamos lejos de entender completamente. Casi instantáneamente, tan pronto como se conecta el conductor metálico a los bornes de la pila, la diferencia de potencial eléctrico se traslada a los extremos del conductor y su efecto se comunica a todos los electrones libres de éste, aumentando su energía de movimiento y arrastrándolos, de modo que fluyan desde un borne a otro en dirección contraria a la del campo eléctrico.

La distribución rapidísima, casi instantánea, de la energía eléctrica a todo el cuerpo del hilo metálico se relaciona de manera substancial con una idea básica de la Física: **El Campo**. Como ya fue señalado, se acepta que al conectar el conductor a una pila o batería, en éste se establece un campo eléctrico cuya manifestación implica el surgimiento de fuerzas eléctricas sobre todas y cada una de las cargas eléctricas individuales del metal. El impulso producido sobre los iones positivos resulta muy pequeño en relación al recibido por los electrones libres, mucho más ligeros y móviles que aquellos; este hecho justifica que en la explicación de la corriente eléctrica sólo se tome en cuenta la acción del campo eléctrico sobre los electrones libres, siendo su arrastre global lo que caracteriza a la corriente eléctrica. Así, en síntesis, se puede afirmar que la diferencia de potencial eléctrica instalada en los extremos del conductor se vincula con una energía eléctrica potencial aprovechable, mientras que el campo eléctrico se usa para referirse a la extensión y distribución de energía en todo el conductor, en donde se disipa en términos finales de energía térmica.

Aunque la energía se disipa en el circuito externo, entre los bornes de la pila se mantiene la diferencia de potencial, por cuanto dentro de ésta se lleva a cabo un proceso continuo de transformación de energía química en eléctrica. Obviamente este proceso no es infinito, por cuanto finalmente la pila se descarga al “agotarse” la fuente; es decir, que se degradan (oxidan o reducen) los componentes químicos que propician la separación de cargas positivas en un borne y de negativas en el otro.

Masa del electrón igual a 9.1×10^{-31} Kg

Masa del protón igual a 1.7×10^{-27} Kg

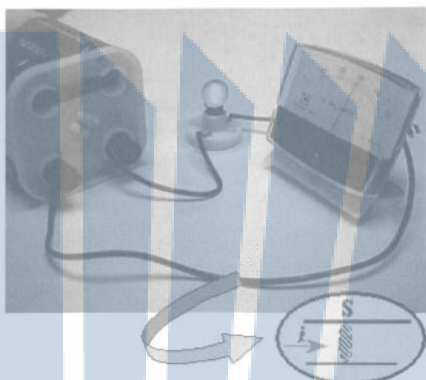
De estos datos se deriva que la masa del protón es aproximadamente 1835 veces mayor que la del electrón

Intensidad de la Corriente Eléctrica

Un número importante de conceptos físicos se expresan mediante otros previamente conocidos y esto ocurre también con la intensidad de la corriente eléctrica en un conductor. En forma más concreta imaginemos un hilo metálico cilíndrico cortado por una superficie matemática transversal S , que en un intervalo de tiempo Δt sea atravesado por una carga eléctrica Δq . Esta información

resulta suficiente para definir la intensidad de la corriente eléctrica como $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, o expresado de otra forma: la intensidad de la corriente eléctrica (I) equivale a la cantidad de carga eléctrica que pasa a través de la superficie (S) por unidad de tiempo (fig. 1.7)

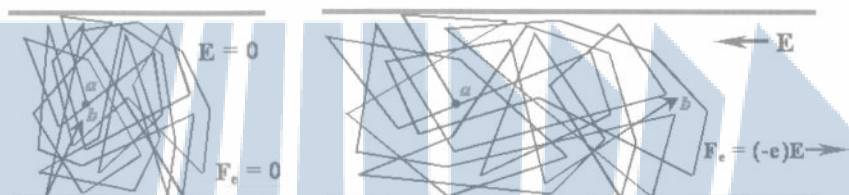
Si esta definición incluyera sólo cantidades totales o macroscópicas, de carga y superficie, es decir extendidas en tiempo y espacio, se aclararía poco sobre los fenómenos involucrados en la corriente eléctrica. Darle mayor significado requiere examinar el fenómeno con mayor detenimiento. En una visión fantástica, atendiendo también a resultados experimentales, dentro de un metal conductor sin corriente eléctrica “veríamos” un número enorme de iones muy masivos formando estructuras cristalinas regulares, donde se repite un patrón reticular; estos iones, no obstante vibran por acción de la energía térmica, permanecen en lugares más o menos fijos. Atendiendo a resultados empíricos, se estima también una inmensa cantidad de electrones libres (10^{22} a 10^{23} por centímetro cúbico), o “nube electrónica” vagando al azar entre la red cristalina; se considera, además, que estos electrones



La intensidad de la corriente eléctrica $i = \Delta q / \Delta t$, se mide en el amperímetro de la fotografía

Fig. 1.7

se colectivizan en el sentido de pertenecer al cristal como un todo y a ningún átomo en particular. En esta situación, la superficie S del conductor será atravesada, en media, por una carga eléctrica nula, debido a que estadísticamente pasarán por ella el mismo número de electrones en un sentido y en el contrario. De esta manera no se establecerá corriente eléctrica alguna ($I = 0$), dado que Δq sería igual a cero.



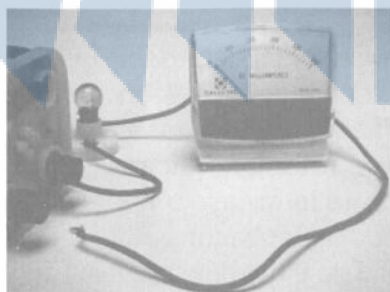
Ilustra el movimiento azaroso (Térmico) de los electrones libre en un hilo metálico sin campo eléctrico

Ilustra el movimiento de electrones libre, resultante de combinar el efecto térmico con la acción del campo eléctrico al conectar el hilo metálico a los bornes de una pila

Fig. 1.8

La situación cambia al conectarse el hilo metálico a los bornes de una pila que mantenga una diferencia de potencial; se establece entonces, como ya fue señalado, de modo casi instantáneo, un campo eléctrico en el interior del conductor que actúa sobre las cargas eléctricas (en especial sobre los electrones libres) logrando que un mayor número de electrones atraviese la superficie en un sentido definido, y como consecuencia la superficie S sería atravesada por una cantidad de carga Δq distinta de cero en un tiempo Δt determinado (fig. 1.8). Finalmente, esta ojeada al mundo microscópico del interior de un metal, nos proporciona una primera idea del concepto de *intensidad de corriente eléctrica*.

Medida de la Corriente Eléctrica

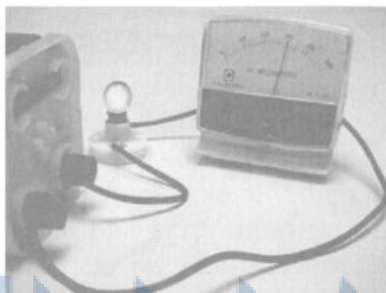


Amperímetro desconectado

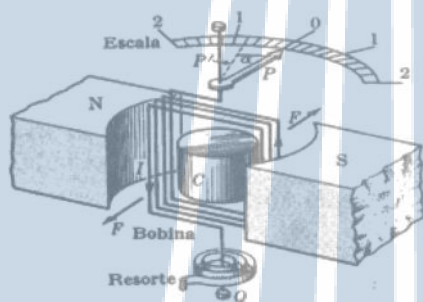
Fig. 1.9a

Lo fascinante de la corriente eléctrica estriba en las manifestaciones y efectos que de ella se derivan: luminosos, térmicos, motores, generadores, sonoros, entre otros. El estudio de éstos y el desarrollo de tecnologías afines requieren la cuantificación y medida de las magnitudes ligadas a la corriente.

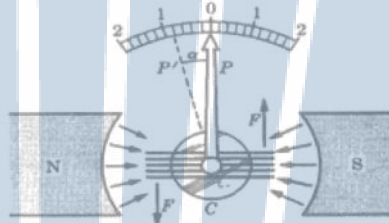
El efecto magnético de la corriente descubierto por Oersted en 1820 (observe la brújula fig. 1.6) despertó un interés considerable, no sólo por revelar la relación entre electricidad y magnetismo, sino también por mostrar la existencia de una fuerza transversal (no lineal) rotatoria, distinta a las de atracción y repulsión ya conocidas como la gravitatoria y eléctrica.



Amperímetro conectado
Fig. 1.9b



La bobina o alambres enrollados, se encuentran entre los polos de un imán fijo (N y S). Al pasar la corriente la interacción imán-bobina hace mover la aguja. Al cesar la corriente, el resorte regresar la aguja a su posición inicial
Fig. 1.10



Este hallazgo generó, en la comunidad científica del momento, la búsqueda de magnitudes y relaciones que permitiesen, de alguna manera, cuantificar la corriente eléctrica. Apenas una semana después de conocer el experimento de Oersted, Andrés María Ampere (1775-1836) presentó a la Academia Francesa resultados que permitían construir un dispositivo electromagnético, aprovechando el efecto motor descubierto por Oersted. Esto hizo posible la construcción de un aparato para medir la **Intensidad de la Corriente Eléctrica (I)**, instrumento que el mismo Ampere denominó "Galvanómetro" (Fig. 1.10) en honor al físico italiano Luigi Galvani (1737-1798).

Unidades del Sistema Internacional de medidas (SI): Voltios, Coulombio y Ampere

Para cuantificar las magnitudes eléctricas se necesita definir unidades pertinentes y disponer de instrumentos adecuados; con este propósito Ampere inventó el galvanómetro, a partir del cual

se construyeron amperímetros, voltímetros y Ohmímetros. El galvanómetro de Ampere se basa en el efecto motor que produce la corriente eléctrica y que en su forma más sencilla queda ilustrado en el experimento de Oersted.

Según Arons A (1970). A.M. Ampere señaló que: "Yo coloqué en direcciones paralelas, dos partes rectas de un dos alambres conductores uniendo los extremos de dos pilas voltaicas. Entonces observé, que cuando hacía pasar una corriente eléctrica al mismo tiempo por ambos alambres, se atraían uno a otro cuando las corrientes fluían en la misma dirección y se repelían cuando éstas tenían direcciones opuestas" (p549)

Las unidades eléctricas se definen de acuerdo a criterios científicos y técnicos de forma que las medidas realizadas puedan expresarse, en lo posible, con números sencillos. De esta manera el Voltio (V), como unidad para medir la fuerza electromotriz (fem) y la diferencia de potencial se define atendiendo a las características técnicas de una batería. Es un hecho que las diferentes celdas electroquímicas, como unidades energéticas básicas de una batería, transfieren al circuito aproximadamente la misma cantidad de energía por carga elemental. Tal cantidad oscila entre $10^{-19} J$ y $2 \times 10^{-19} J$. Se deriva de aquí la conveniencia de definir el voltio (Unidad Internacional de Medida (SI) de diferencia de potencial eléctrica) como $1,6 \times 10^{-19}$ Joules/carga del electrón (J/e). Aquí, al reemplazar la carga del electrón en coulombios queda:

$$1e = 1,6 \times 10^{-19} C \quad 1Coulombio = 6,25 \times 10^{18}e.$$

En efecto, resulta: $1V = 1,6 \times 10^{-19} J/e = 1,6 \times 10^{-19} J / 1,6 \times 10^{-19} C$
 $1V = 1 J/C$. Donde el voltios (V), Joules (J) y coulomb (C) son unidades del Sistema Internacional de medidas (SI).

El ampere (A) es la unidad (SI) de la intensidad de corriente eléctrica¹. De esta manera, atendiendo a la definición de intensidad de corriente ($I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$), resulta:

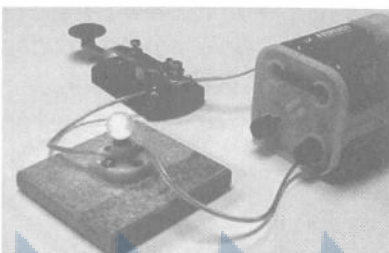
Una batería de 12 voltios contiene 6 celdas electroquímicas. Cada celda produce $3,2 \times 10^{-19} J/e$. Luego, la batería de 12 V proporcionará: $(3,2 \times 10^{-19} J/e) \cdot 6 = 19,2 \times 10^{-19} J/e$
 De donde resulta: $\frac{19,2 \times 10^{-19} J}{1,6 \times 10^{-19} C} = 12 V$

$$1A = \frac{coulombio}{segundo} = 6,25 \times 10^{18} \frac{cargas elementales}{segundo} = 6,25 \times 10^{18} \frac{e}{s}$$

¹ Otra definición del Ampere está dada en la página 95

Circuitos Eléctricos de Corriente Continua

Como ya fue expresado, la corriente continua se genera en pilas, baterías eléctricas y en dispositivos especiales. Además se le vincula a campos eléctricos constantes, es decir que no varían en magnitud ni en dirección, por lo que el arrastre de electrones libres se mantiene en un sentido determinado y la intensidad de la corriente no varía con el tiempo. A este tipo de corriente se le denomina **estacionaria o continua**.



Circuito sencillo y su esquema
Fig. 1.11

En un montaje como el de la Fig. 1.11, al cerrar el interruptor la energía eléctrica disponible en los bornes de la batería se distribuye, en forma rápida y eficiente, por todo el circuito. No obstante, que en la técnica se usen instalaciones eléctricas más complejas, la mostrada parece contener suficientes elementos para sustentar la construcción de los primeros sistemas de conceptos relacionados con los circuitos de corriente continua.

Resistencia Eléctrica: Ley de Ohm

En nuestro ambiente doméstico y profesional se encuentran innumerables aparatos eléctricos, todos, incluido los cables conectores tienen **resistencia**, que regula el paso de la corriente eléctrica. En este orden la técnica produce los **resistores**, regularmente de carbón con resistencias específicas que van desde fracciones de Ohm hasta megaohmios. En relación con la resistencia (R) de un conductor, la intensidad de la corriente (I) y la diferencia de potencial (V) en un circuito, George Simon Ohm, físico alemán del siglo XIX, después de arduo trabajo llegó a conclusiones trascendentes:

- La resistencia (R) de un conductor, es directamente proporcional a su longitud (L)
- La resistencia (R) de un conductor, es inversamente proporcional al área transversal (S);

- La resistencia (R), depende del material conductor (cobre, hierro, plata, etc.). Esta característica se expresa mediante el coeficiente de resistividad (ρ)

Aspectos Históricos asociados con la ley de Ohm

El alemán, Georg Simón Ohm (1787 y 1854), quien entre los años de 1826 y 1827 desarrollo sus investigaciones a fin de establecer operacionalmente la relación entre la intensidad de la corriente y la resistencia de los conductores. Para ello enfocó su atención en tres leyes principales y las comparaciones tanto en las propagaciones eléctricas y térmicas como en la conductibilidad eléctrica de distintos materiales. En su actividad fue necesario sortear inconvenientes de tipo técnico. El primero con la fuente de energía eléctrica, la pila de Volta presentaba dificultad para mantener constante los valores de la intensidad de la corriente, para ello, Ohm prefirió utilizar la pila Termoeléctrica o efecto Seebeck, propuesto en el año de 1822 por físico alemán Thomás Joham Seebeck (1770-1831). No obstante, los valores de la intensidad que generaba este dispositivo no eran muy elevados, lo cual condujo a otra dificultad al momento de realizar las medidas. En esta oportunidad, el investigador construyó su propio galvanómetro de alta sensibilidad basándose en los diseños propuestos por Ampere.

Atendiendo a los argumentos teóricos-experimentales asociados a la conducción eléctrica de los metales, su discípulo, el francés Claudio Pouillet (1790-1868), quien en el año de 1831 con un método más riguroso y concluyentes, dejando poco espacio para la duda, llegó a los mismos resultados de maestro, no obstante, el mérito es para Ohm, quien con hipótesis y un trabajo analítico más simple logró obtener tan importante ley de la electricidad. Este corto e interesante pasaje de construcción teórica de la Física es una muestra más de que ésta es producto del arduo trabajo de los hombres que han buscado dar respuesta inteligible de las manifestaciones del entorno natural físico.

En adición, en el año de 1826 el físico Alemán George Simon Ohm propuso una fórmula empírica que relaciona algunos de sus resultados y cuya expresión contemporánea es

la siguiente

$$I = \frac{V}{R} \quad 1.1$$

Como se indica antes, la interpretación simple de los trabajos de Ohm lleva a relacionar a R no sólo con I y V sino también con factores geométricos del conductor: R es directamente proporcional a $\frac{L}{S}$, donde la igualdad se establece introduciendo una constante para cada material denominada coeficiente de resistividad (ρ). Así $R = \rho \frac{L}{S}$

Estas dos expresiones reflejan una propiedad muy notable y general de la materia denominada Ley de Ohm, $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. En muchos materiales sólidos y homogéneos, incluyendo la mayoría de los metales, la densidad de corriente (\vec{j}) y el campo eléctrico \vec{E} son proporcionales, y su constante de proporcionalidad es la conductividad σ . Los materiales que cumplen con esta condición se le denominan Óhmicos. Esta densidad de corriente \vec{j} referida en la Ley de Ohm, en un concepto microscópico, se refiere a la cantidad de electrones libres que por unidad de tiempo atraviesan la sección transversal de un conductor.

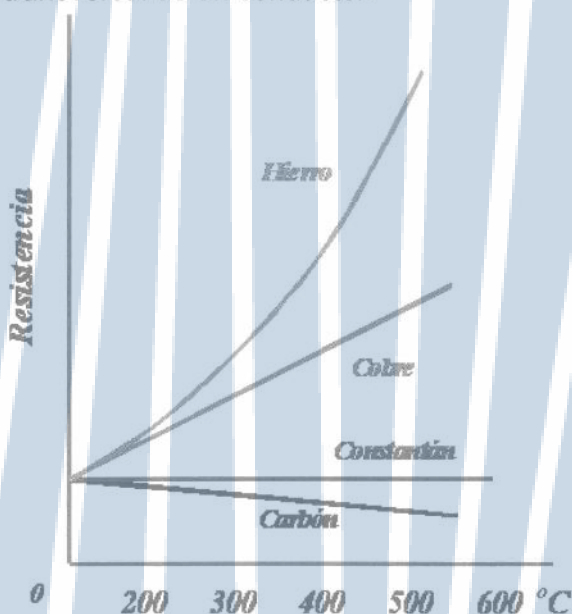


Fig. 1.12

De la fórmula anterior se infiere que conocidos L , S , y ρ de un material se puede calcular el valor de su resistencia. Ejemplo: un alambre de constantán de longitud 1m y diámetro $\phi = 0,5$ mm, tendría una resistencia de 2,55 Ω .

Recuerde que:

$$S = \pi r^2 \text{ y } r = \frac{\phi}{2} \quad R = \frac{5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m} \cdot 1 \text{ m}}{\frac{\pi \cdot 2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2}{4}} = 2,55 \Omega$$

Ciertamente, la práctica demuestra que la resistencia de un conductor depende también de su temperatura.

En efecto, se considera conveniente resaltar que se ha demostrado experimentalmente que los materiales modifican el valor de su resistencia cuando varía la temperatura, como se puede apreciar claramente en la gráfica de la Fig. 1.12. Obsérvese que el hierro y el cobre aumentan su resistencia con la temperatura; el constantán se muestra prácticamente independiente de ese factor, mientras que el carbón la disminuye. La influencia de

Tabla de valores de Resistividad eléctrica (ρ) y Coeficiente de Temperatura (β) de algunos materiales a una Temperatura de 20 °C

<i>Materiales</i>	ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	β ($^{\circ}C^{-1}$)
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Hierro	10×10^{-8}	$5,0 \times 10^{-3}$
Tungsteno	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Carbón	$3,5 \times 10^{-5}$	$-0,5 \times 10^{-3}$
Constantán	$5,0 \times 10^{-7}$	$-4,0 \times 10^{-5}$
Estaño	$1,2 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-3}$

El signo negativo significa que la resistencia disminuye con el incremento de la temperatura

la temperatura en la resistividad de un conductor se expresa en el coeficiente de temperatura (β) y se define como la variación de resistividad (ρ) por unidad temperatura (T) y por

unidad de resistividad, es decir $\beta = \frac{\Delta\rho}{\rho_0 \Delta T}$. A partir de esta definición, y teniendo en cuenta que $\Delta\rho = \rho - \rho_0$, y $\Delta T = T - T_0$,

se obtiene $\rho = \rho_0 [1 + \beta (T - T_0)]$. Donde ρ_0 es la resistividad del material a una temperatura T_0 , β el coeficiente de temperatura y ρ la resistividad a la temperatura T .

En la tabla anterior puede observarse como la resistividad depende de la temperatura del material, como queda registrado en los valores de β . Puede verificarse también, la concordancia entre los valores de la tabla y la gráfica anterior. En la tabla al constantán le corresponde un coeficiente de temperatura muy bajo y por consiguiente el valor de su resistencia es prácticamente independiente de la temperatura. Nota: *El constantán es una aleación -Cobre (60%) y Níquel (40%)- que regularmente se usa en experimentos con fines didácticos.*

Por ejemplo: Un alambre de cobre, a una temperatura de 30°C, tiene una resistencia de 5 Ω . ¿A qué temperatura la resistencia del conductor pasa a ser de 4,5 Ω ?

Respuesta: En la tabla, el coeficiente de temperatura del cobre es $\beta = 3.9 \times 10^{-3}^{\circ}C$

$$T_o = 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \text{ De la fórmula } R = R_o [1 + \beta (T - T_o)]$$

$$R_o = 5\Omega$$

$$R = 4,5\Omega \quad - \text{ Se obtiene } T = \frac{R - R_o}{R_o \beta} + T_o$$

Sustituyendo los valores conocidos y simplificando queda:
 $T = 4,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como se ha expuesto, determinar el valor de una resistencia no es tan sencillo. En este orden resaltamos la aparente contradicción en las fórmulas que parecen definirla operacionalmente $R = \frac{V}{I}$ y $R = \rho \frac{L}{S}$

Fuerza Electromotriz (fem) de una Batería o Pila

Como ya fue expresado, las baterías o pilas eléctricas son dispositivos de alguna complejidad, donde se transforma energía química en eléctrica, a partir de reacciones químicas que logran separar electrones (formando los iones), transformándose la energía potencial de los enlaces atómicos de sus componentes (energía química) en energía potencial eléctrica de las cargas acumuladas en los bornes. Esta distribución de cargas origina la diferencia de potencial y el campo eléctrico entre los bornes, así como la capacidad energética antes mencionada.

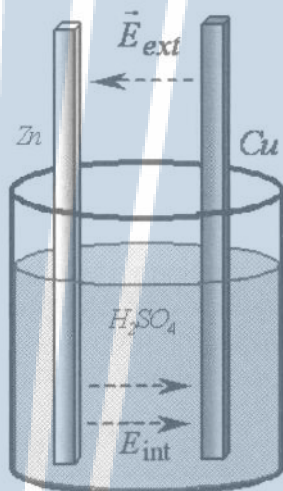


Fig. 1.13

En consecuencia, la *fem* de una batería o pila (ε) es una magnitud que la caracteriza y representa la cantidad de *energía que ésta suministra* para transportar cada unidad de carga eléctrica a lo largo de todo el circuito. En forma simbólica se expresaría de la forma siguiente:

$$\varepsilon = \frac{Es}{q} \quad Es \text{ Energía suministrada; } q \text{ Carga eléctrica transportada}$$

Por ejemplo, una pila de linterna proporciona una capacidad energética de $2,4 \times 10^{-19} \text{ j/e}$.

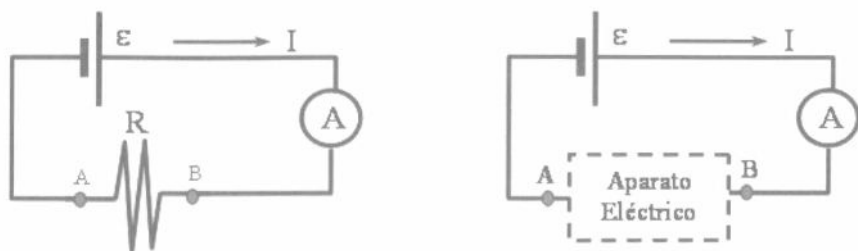


Fig. 1.14

En un circuito simple como el de la figura 1.14, la *fem* del generador produce una intensidad de corriente cuyo valor es el mismo en todos puntos o partes del circuito (¿Principio de Conservación de la Carga?). Si el fenómeno se observa durante un intervalo de tiempo Δt , la carga transportada sería $q = I \cdot \Delta t$ y la energía suministrada por el generador es $E_s = \varepsilon q$. De estas dos relaciones es fácil obtener la potencia suministrada por el generador como:

$$P = \frac{E_s}{\Delta t} = \varepsilon I \quad 1.2$$

Diferencia de Potencial

Análogo a la *fem*, la diferencia de potencial entre los extremos A y B de una resistencia eléctrica (V_{AB}), se define como *la energía utilizada* para transportar a cada unidad de carga eléctrica entre sus extremos. En el circuito mostrado.

$$V_{AB} = \frac{Et}{q} \quad Et \text{ energía utilizada; } q \text{ carga eléctrica transportada}$$

A partir de esta relación, aplicando el concepto de potencia y de intensidad de corriente, se obtiene: $P_u = V_{AB} \cdot I$ 1.3 Donde P_u es la potencia utilizada o disipada en R .

Como puede observarse, tanto ε , como la diferencia de potencial ΔV se miden en Voltios y ambas se definen en términos de energía por unidad de carga eléctrica. Pero ¿En qué se diferencian? ¿Será apenas una sutileza de lenguaje?, pues:

ε -- hace referencia a la *energía por unidad de carga suministrada* por la fuente

V_{AB} -- hace referencia a la *energía por unidad de carga utilizada* o disipada en un aparato o resistencia ubicado entre A y B

Potencia Eléctrica

En los aparatos eléctricos “resistivos”, como las hornillas de cocina, casi toda la energía eléctrica suministrada, para su funcionamiento, se transforma en energía térmica. La *potencia* de estos aparatos, cuyo valor se indica generalmente en una etiqueta sobre ellos, se refiere a la *rapidez* del proceso, es decir, a la cantidad de energía transformada en cada unidad de tiempo.

$$\text{Potencia Eléctrica} = \frac{\text{Cantidad de Energía transformada en le Aparato}}{\text{Tiempo de Funcionamiento}}$$

Acorde a esta definición, en el Sistema Internacional (SI) la potencia se expresa en vatios (W), de manera que un vatio ($1W$) corresponde a la transformación de un Joule ($1J$) de energía en un tiempo de un segundo ($1s$), es decir

$$1W = \frac{1J}{1s}$$

Ejemplo: Una plancha de alisar ropa de $1100 W$ tiene la capacidad de transformar $1100 J$ de energía eléctrica en energía térmica en cada segundo de funcionamiento.

Potencia y Trabajo

La “potencia” es una magnitud física que conlleva una idea más amplia que la antes expuesta; como es sabido, en el ámbito de Mecánica denota la rapidez para realizar un trabajo mecánico, es decir:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo realizado}}{\text{Tiempo para hacerlo}}$$

En forma abreviada:

$$P_m = \frac{T_m}{\Delta t}$$

Por otra parte, los conceptos de “Trabajo” y Energía, empero distintos, aparecen como equivalentes en los sistemas mecánicos conservativos (sin disipación de energía). En el llamado “*Teorema del trabajo y la energía*”, el trabajo (T) realizado por una fuerza sobre un cuerpo equivale a la variación de su energía cinética (E_c) que el cuerpo experimenta;

$$T = \Delta E_c$$

Consecuentemente con este resultado, es usual medir la energía y el trabajo en las mismas unidades. Así por ejemplo,

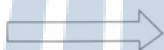
se dice: un motor realiza un trabajo de $25 J$; y la energía térmica disipada por un alambre conductor es de $20 J$, etc.

Estas consideraciones dan algún fundamento a la usual relación establecida entre:

Fórmulas
mecánicas

$$P_m = \frac{T_m}{\Delta t}$$

$$P_m = \frac{E_m}{\Delta t}$$



Fórmulas
eléctricas

$$P_E = \frac{T_E}{\Delta t}$$

$$P_E = \frac{E_E}{\Delta t}$$

$$T_E = P_E \cdot \Delta t \quad 1.4$$

Donde, T_m : Trabajo mecánico

P_m : Potencia mecánica

Δt : Tiempo de funcionamiento

Donde, T_E : Trabajo eléctrico

P_E : Potencia eléctrica

Δt : Tiempo de funcionamiento

Costo de la Energía Eléctrica

La fórmula 1.4 resulta útil para calcular el costo de la energía eléctrica consumida en los hogares. Por ejemplo, en Aragua, "CADAFE" cobra el consumo de energía eléctrica en términos de Trabajo Eléctrico, y la unidad usada es el Kilovatio-hora (KWh).

$1KWh$ equivale al trabajo eléctrico realizado por un aparato eléctrico cuya potencia sea de $1000W$, funcionando durante una hora sin parar. Por ejemplo, una plancha eléctrica de $P = 1100W$, funcionando dos horas continuas, realizaría un trabajo eléctrico de: $T_E = 1,1 KW \cdot 2h = 2,2 KWh$, CADAFE compañía que suministra la energía eléctrica en la zona central de Venezuela, cobraba en el 2006 aproximadamente Bs. 70 por cada KWh ; así, por ejemplo, una familia, con tarifa 02, servicio residencial y consumo promedio mensual de $571 KWh$, cancelaría por el servicio eléctrico Bs. 39.970,00.

Disipación Térmica en los Conductores: Ley de Joule

Es un hecho conocido que cuando se establece una corriente eléctrica en un conductor metálico éste incrementa su temperatura. El fenómeno mencionado es denominado usualmente "efecto calórico o efecto Joule", en cuya explicación se acepta la idea

de que el incremento de energía cinética que experimentan los electrones libres de un conductor metálico por efecto del campo eléctrico se transfiere, de alguna manera, a sus iones aumentando su vibración, produciéndose en consecuencia la elevación de la temperatura. Resaltamos que en este proceso se acepta la idea que toda la energía eléctrica suministrada a una resistencia (R) se transforma "totalmente" en energía térmica, de esta manera, sea:

V_R = diferencia de potencial en los extremos de R ;

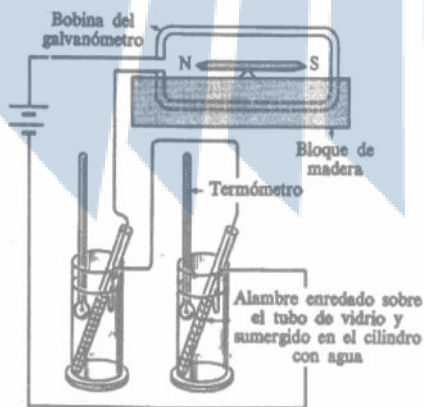
I = intensidad de la corriente eléctrica a través de R ;

E_s = energía eléctrica gastada en R ;

P = potencia eléctrica desarrollada en R ;

q = Carga eléctrica transportada a través de R ;

t = tiempo de observación del fenómeno.



El físico inglés James Prescott Joule (1818-1889), determinó experimentalmente, en el año de 1841, la relación entre la electricidad y la energía térmica disipada en un conductor, partiendo del hecho primario que todo conductor resistivo por donde pasa una corriente eléctrica incrementa su temperatura. Para ello tomó en consideración: la razón del valor de las dos resistencias conectadas en serie; el incremento de la temperatura en ambas resistencias durante un intervalo de tiempo fijo, como se muestra en el gráfico; la rapidez con el cual se desarrolla el calor, la cual es proporcional a la resistencia. Finalmente, la Energía térmica disipada era proporcional al cuadrado de la corriente, a la resistencia y al tiempo durante el cual circulaba la corriente por los conductores, $Q = K I^2 R \Delta T$, donde K es la llamada "equivalente eléctrico del calor" cuyo valor es de 0,2388 cal / joule.

$$\text{Entonces: } V_R = \frac{E_s}{q} \Rightarrow V_R \cdot q = E_s;$$

dividiendo esta igualdad entre Δt , distinto de cero, se obtiene:

$$\frac{V_R q}{\Delta t} = P \Rightarrow P = V_R I$$

Usando la ley de Ohm en esta última igualdad se obtienen las siguientes fórmulas:

$$P = R I^2 \quad \text{y} \quad P = \frac{V_R^2}{R} \quad 1.5$$

Los Circuitos Eléctricos y La Conservación de la Energía

En el presente enfoque, se acepta la idea de que toda la energía eléctrica suministrada por la fuente se transforma en los resistores (internos y externos) y/o aparatos eléctricos en energía de otro tipo en concordancia con el Principio de Conservación de la Energía. Por ejemplo, la energía suministrada por la red domiciliaria de 110 voltios a un bombillo de 100W se transforma en éste en energía térmica y luminosa.

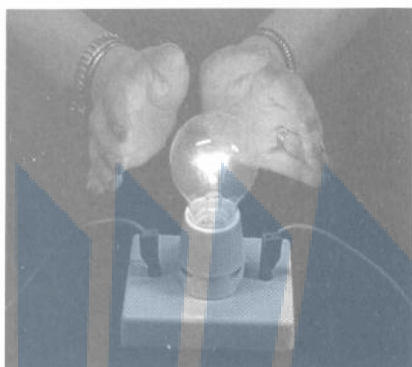


Fig. 1.15

En el circuito de la figura 1.15, la energía suministrada por la batería se transforma en energía térmica y luminosa en el filamento del bombillo en las resistencias que forman al circuito (efecto Joule), incluyendo la resistencia interna de la batería, ya que ésta también consume energía. Si en estas condiciones se deja de lado la energía disipada en los cables conductores, por ser mucho menor que la disipada en las resistencias, la cantidad de energía suministrada por la fuente es aproximadamente igual a la suma de la energía transformada en térmica en las resistencias del circuito (Principio de Conservación de la Energía). Estas informaciones interpretadas de acuerdo al concepto de potencia permiten escribir la siguiente relación:

$$\text{Potencia suministrada por la fuente} = \text{Potencia consumida en el circuito}$$

De esta igualdad se derivan:

P_s potencia suministrada por la fuente

P_r potencia consumida en la resistencia interna de la fuente (r)

P_R potencia consumida en la resistencia externa (R)

$$P_s = P_r + P_R;$$

es decir, $\mathcal{E}i = i^2 R + i^2 r$, a partir de esta relación se obtiene:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad 1.6$$

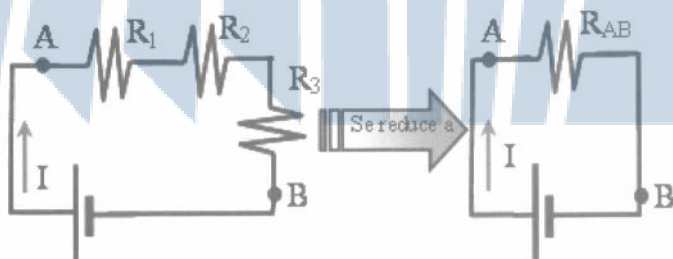
En consecuencia, podemos decir que la corriente eléctrica en un circuito es directamente proporcional a la fuerza electromotriz suministrada por la fuente, e inversamente proporcional a la suma de las resistencias del circuito. Compare ahora esta ecuación con la Ley de Ohm antes estudiada. ¿En qué se diferencian? ¿A qué se debe tal diferencia? ¿Qué tienen en común?

Asociaciones de Resistencias

Generalmente, en un circuito, se da el nombre de “resistor” (R) a un sector pequeño de un conductor que se distingue por su alta resistividad (ρ) en comparación con la de los cables conductores. El uso técnico de un resistor requiere que el fabricante señale su valor en Ohmios (Ω) y la potencia que pueden tolerar sin dañarse; por ejemplo, se hablaría de un resistor de 120Ω y $2 W$, queriendo señalar con ello no solamente que tiene una resistencia de 120Ω , sino que en ella se transforman hasta $2 J$ de energía eléctrica en térmica por cada segundo de funcionamiento.

Dependiendo de las características y las necesidades técnicas en los circuitos los resistores se unen en combinaciones más o menos complejas, sin embargo, éstas tienen como base asociaciones muy sencillas: resistores en Serie y resistores en Paralelo.

Resistencia de Combinación en Serie



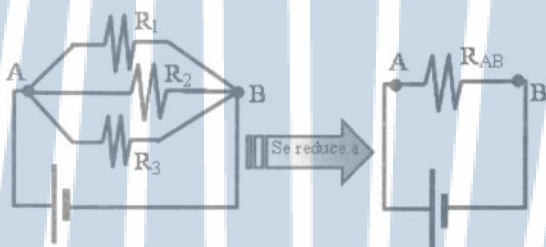
El circuito ilustrado los resistores R_1 , R_2 y R_3 están en serie y en consecuencia la intensidad de la corriente I que circula por ellas tiene el mismo valor. En este tipo de conexión, la resistencia

de combinación (R_{AB}) que sustituya a las resistencias parciales sin modificar la intensidad de la corriente, es:

$$R_{AB} = R_1 + R_2 + R_3$$

Es sencillo demostrar la igualdad anterior; en efecto si consideramos que $P_{AB} = P_1 + P_2 + P_3$ dado que, P_{AB} sería la potencia disipada en la resistencia de combinación R_{AB} y P_1 , P_2 y P_3 son las potencias parciales disipadas en cada resistencia, se tiene entonces: $R_{AB} I^2 = R_1 I^2 + R_2 I^2 + R_3 I^2 \rightarrow R_{AB} = R_1 + R_2 + R_3$

Resistencia de Combinación en Derivación



En el siguiente esquema, R_1 , R_2 y R_3 están conectadas en derivación. También en este caso se obtiene con facilidad el valor de la resistencia de combinación R_{AB} , conservando ahora la diferencia de potencial en los extremos (A B). R_1 , R_2 y R_3 se relacionan con R_{AB} mediante: $\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

Es fácil deducir la relación anterior, en efecto, al igual que las resistencias en serie, la potencia eléctrica de combinación P_{AB} debe ser igual a la suma de las potencias parciales, es decir, $P_{AB} = P_1 + P_2 + P_3$.

De esta igualdad se tiene:

$$\frac{V_{AB}^2}{R_{AB}} = \frac{V_{AB}^2}{R_1} + \frac{V_{AB}^2}{R_2} + \frac{V_{AB}^2}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Pilas y Baterías en Serie

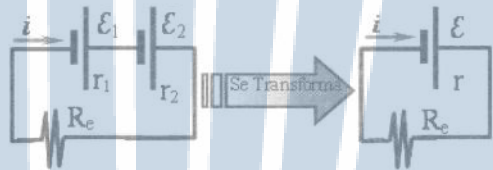
Las pilas y baterías eléctricas tienen su fuente básica de energía en las celdas electroquímicas, como ya fue señalado anteriormente, designando con la letra \mathcal{E} la *fem* de estos dispositivos. También fue señalado que las pilas y baterías presentan resistencias internas, razón por la cual los esquemas que la representan en los circuitos incluyen símbolos para designar no sólo la *fem* sino también la resistencia interna (r); usualmente en los textos se representa gráficamente como:



Aquí, la línea más larga corresponde al electrodo positivo y la más corta el negativo

El gráfico que se presenta a continuación muestra dos pilas en serie colocadas de manera que el polo positivo de una de ellas está unido al polo negativo de la otra.

En la conexión expuesta es posible transformar el esquema del circuito en otro de la misma intensidad de corriente, si

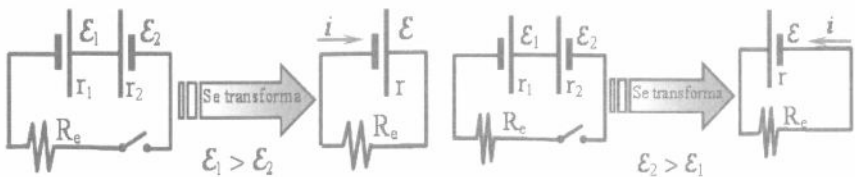


sustituimos las dos pilas por otra que proporcione una *fem* resultante igual a $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ y $r = r_1 + r_2$. En este orden, si P_1 y P_2 representan las potencias de cada pila, la potencia de total sería:

$$P = P_1 + P_2 \Rightarrow \mathcal{E}i = \mathcal{E}_1 i + \mathcal{E}_2 i \Rightarrow \boxed{\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}$$

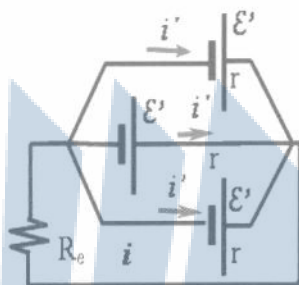
En el caso de conexión de las pilas en serie donde los polos del mismo signo aparecen unidos entre sí, la *fem* resultante es $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$, $r = r_1 + r_2$, cuando $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$

Mientras que $\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$, $r = r_1 + r_2$, cuando $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$



Pilas y Batería en Derivación

Se tratará ahora de las combinaciones de pilas o baterías de la misma *fem* con bornes de igual signo conectados entre sí. El circuito siguiente ejemplifica una conexión de este tipo. Aquí también la potencia total P , es igual a la suma de las potencias parciales, P' ; así, $P = 3P'$, es decir, de acuerdo con la fórmula 1.2 $i\varepsilon = 3i'\varepsilon'$ y dado que $i=3i'$, resulta finalmente que $\varepsilon = \varepsilon'$. En conclusión, la combinación de las tres pilas en derivación proporciona una *fem* equivalente a una de ellas, mientras que la potencia total es la suma de las potencias parciales.



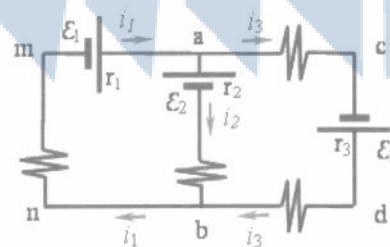
Reglas de Kirchhoff

Un circuito de alguna complejidad como el representado en el siguiente esquema, exige para su resolución de la aplicación de unas reglas especiales propuestas por el físico Gustavo Kirchhoff (1824-1887). Estas reglas son enunciados prescriptivos compatibles con las leyes de conservación de la carga y la energía.

Regla de los nudos

La suma algebraica de las intensidades de corriente eléctrica que llegan o salen de un nudo es cero (0). Es decir, $\sum i = 0$. Un nudo es un punto del circuito donde convergen o divergen dos o más corrientes "a" y "b" en el esquema son nudos.

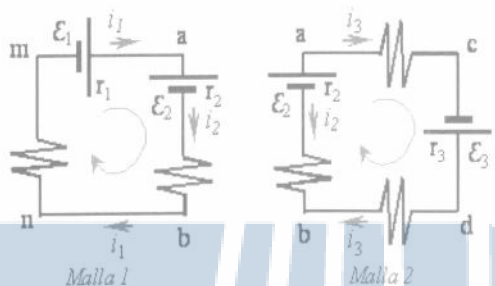
Regla de las Mallas



La suma algebraica de las *fem* en una malla es igual a la suma algebraica de los productos Ri , que se obtiene al recorrer toda la malla, esto expresado de otra forma es $\sum \varepsilon = \sum Ri$

Los elementos del circuito conectados en una sola serie forman un lazo o malla; en el esquema circuitual antes dibujado los recorridos **mabnm** y **acdba** son mallas.

Procedimiento para Aplicar las reglas de Kirchoff



- Ubicar los nudos y seleccionar las mallas.
- Dibujar los sentidos de las corrientes que llegan o salen a cada nudo. Tomar en cuenta que estas direcciones son arbitrarias tal como

se ha indicado en el ejemplo precedente al interpretarse los recorridos mediante pequeñas flechas. Al nudo "a" llega i_1 y salen i_2 e i_3 , mientras que al nudo "b" llegan i_2 e i_3 y sale i_1 . Arbitrariamente se le asigna el signo positivo a las corrientes que llegan a un nudo y negativo a las que salen.

- Representar el circuito en mallas separadas tal como las antes mostradas. Obsérvese que estas mallas forman parte del circuito total, como se resalta en el esquema.
- Asignar y marcar como positivo (+) el sentido de la *fem* del polo negativo al positivo en cada fuente.
- Escoger el sentido positivo de recorrido de las mallas. En el ejemplo examinado se eligió como tal el mismo que siguen en su movimiento las agujas del reloj.
- Al aplicar las reglas de las mallas y establecer las ecuaciones correspondientes se determinan los signos de la *fem* y de las intensidades: la *fem* o intensidades son positivas si los sentidos escogidos para ambas magnitudes coincide con el recorrido positivo seleccionado para las mallas. Por otra parte, el signo tanto de la *fem* como de las intensidades es negativo cuando las direcciones que se le han asignado son opuestas al sentido de recorrido seleccionado para las mallas.

Al resolver los sistemas de ecuaciones derivados de la aplicación de las reglas de Kirchoff es probable que algunas intensidades resulten negativas, esto significaría que el sentido escogido inicialmente para esas corrientes era realmente opuesto. Debido a esta situación, para una mejor comprensión de la situación física, recomendamos que se dibuje el circuito de nuevo, indicando las direcciones reales de las intensidades. Es decir, cambiar el

sentido de las intensidades que resulten negativas en el cálculo y resolver el circuito de nuevo. Al proceder de esta manera, los valores absolutos de las intensidades deberían repetirse pero todas deberían resultar positivas.

Actividades de Reconstrucción del Conocimiento

Después de la lectura crítica del capítulo sobre la energía eléctrica, trata, individual o grupalmente, de responder a las siguientes interrogantes:

- En el texto se afirma que en las baterías no hay ni creación de cargas ni producción de energía, ¿cómo, entonces, podríamos explicar la existencia de cargas y la obtención de la energía eléctrica a partir de ella?
- ¿Qué tan útil resulta la energía eléctrica?
- ¿Vale la pena lo que pagamos por ella?
- ¿De donde proviene y cómo llega la energía eléctrica que usamos en la casa, el trabajo, etc.?
- ¿Podríamos racionalizar el uso de la energía eléctrica en términos de costos y posibilidades de producción?

Se espera que las respuestas expresen, tanto la coherencia inteligente de la información del texto leído, la experiencia y saberes previos del aprendiz, así como su capacidad de opinar y dar su punto de vista razonado.

Sugerencias: Trate de incorporar informaciones actuales sobre el número de aparatos eléctricos de uso en su casa, el número de kilovatios-hora consumidas mensualmente, precio del kilovatio-hora, costos y forma de ahorro posibles.

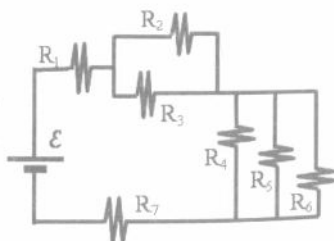
Circuitos Eléctricos: Ejercicios Resueltos

1.- En el circuito representado en la figura las resistencias indicadas se miden en ohmios:

$$R_1 = 10\Omega, R_2 = 12\Omega, R_3 = 6\Omega, R_4 = 18\Omega,$$

$$R_5 = 9\Omega, R_6 = 3, R_7 = 14\Omega \text{ y la fuente proporciona } 6 \text{ V y su resistencia}$$

interna es de 1Ω . Determine: a) la resistencia de combinación; b) la



intensidad en cada una de las resistencias; c) las diferencias de potenciales parciales.

Procedimiento:

I.- Se Reduce el circuito hasta su forma más sencilla, mediante el cálculo de resistencias de combinación. Para ello se procede a:

a. Determinar la resistencia de combinación R_A correspondiente a R_2 y R_3 conectadas en paralelo:

$$R_A = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{12} + \frac{1}{6}} = \frac{1}{\frac{1+2}{12}} = 4\Omega$$

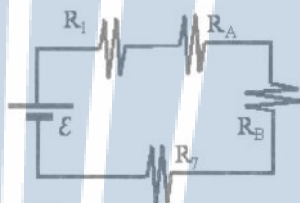
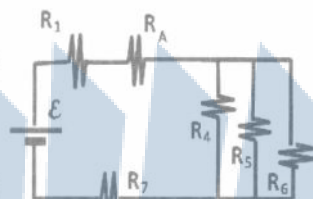
b. Determinar la resistencia de combinación R_B correspondiente a R_4 , R_5 y R_6 también en paralelo:

$$R_B = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = \frac{1}{\frac{1}{18} + \frac{1}{9} + \frac{1}{3}} = \frac{1}{\frac{1+2+6}{18}} = 2\Omega$$

c. El circuito inicial se reduce a un esquema de resistencias en serie, formado por R_1 , R_A , R_B , R_7 , así la resistencia total del circuito es $R_e = 10 + 4 + 2 + 14 = 30\Omega$

d. El circuito eléctrico queda reducido a su forma más simple, donde la intensidad es:

$$I_T = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{\mathcal{E}}{13\Omega} = 0,19 \text{ A}$$



II.- Estos valores sirven para determinar las magnitudes parciales, para ello se recomienda reconstruir el circuito calculando en cada paso los valores requeridos:

a. Las diferencias de potenciales parciales de las resistencias R_1 , R_A , R_B y R_7 , se obtienen aplicando la Ley de Ohm y tomando en consideración que su intensidad total es la misma en todas ellas. Así: $V_1 = I_T R_1 = 0,19 \text{ A} \cdot 10 \Omega = 1,9 \text{ V}$;

$V_A = 0,76 V$; $V_B = 0,38 V$; $V_7 = 2,6 V$ y $V_r = 0,19 V$
 (caída de potencial en la resistencia interna). La suma de estos potenciales parciales debe ser aproximadamente igual a de la fuente.

- b. Cálculo de las intensidades parciales en cada resistencia, esto se lleva a cabo aplicando la ley de Ohm en cada una de ellas, así:

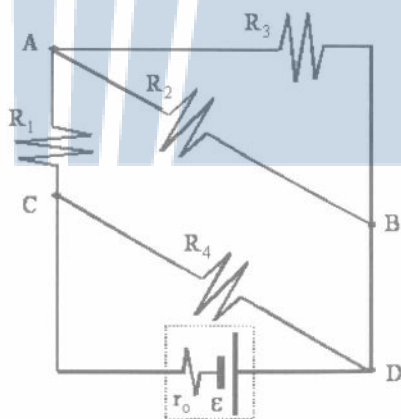
$$I_2 = \frac{V_A}{R_2} = \frac{0,76 V}{12 \Omega} = 0,06 A; \quad I_3 = 0,13 A; \quad I_4 = \frac{V_B}{R_4} = \frac{0,38 V}{18 \Omega} = 0,02 A$$

$$I_5 = 0,04 A \quad \text{y} \quad I_6 = 0,13 A$$

III.- En resumen:

- a. La suma de las diferencias de potenciales parciales debe ser igual a fem suministrada, es decir, $\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n I R_i$, incluyendo la caída de potencial generada a la misma fuente, (regla de las Mallas), esta afirmación se refiere al circuito reducido de una sola malla formada por R_p , R_A , R_B y R_7 y la resistencia interna de la fuente.
- b. La intensidad es constante, para todo el circuito en serie:
 $I_T = 0,19 A$; $I_1 = I_{RA} = I_{RB} = I_7$
- c. En las resistencias en paralelo (R_A y R_B), la suma de las intensidades parciales resultan ser iguales a $I_T = 0,19 A$, es decir: $I_T - I_2 - I_3 = 0$ y $I_T - I_4 - I_5 - I_6 = 0$ (Regla de los Nodos)

- 2.- La siguiente figura representa un circuito que dispone de una fuente de energía eléctrica de 10 voltios con resistencia interna de 1Ω , además esta formado por conjunto de resistencias externa de 4Ω cada una. Determine la intensidad de la corriente eléctrica en R_3 .



Para resolver este ejercicio, es necesario conocer la diferencia de potencia en los extremos de R_3 , para luego aplicar la Ley de Ohm:

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3}$$

Para ello se observa:

- a. Las resistencias R_2 y R_3 que se encuentran entre los puntos A y B están en paralelo.

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow R_{23} = 2\Omega$$

- b. Las resistencias R_1 y R_{23} entre los puntos C y B están en serie $R_{123} = R_1 + R_{23} \Rightarrow R_{123} = 6\Omega$

- c. Las resistencias entre los puntos C y D están en paralelo

$$\frac{1}{R_{1234}} = \frac{1}{R_{123}} + \frac{1}{R_4} \Rightarrow R_{1234} = \frac{12}{5}\Omega = 2,4\Omega$$

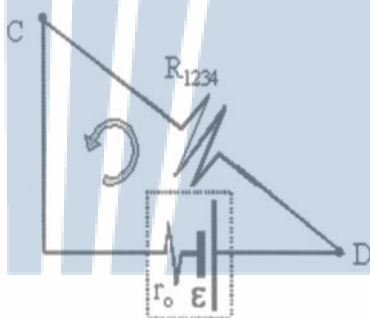
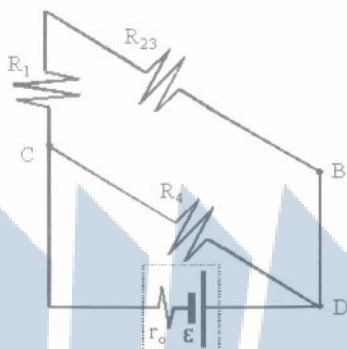
- d. Al obtener el circuito de combinación más simple, se aplican las reglas de Kirchhoff para determinar las intensidades. Para ello se define de manera arbitraria: a) el sentido de la intensidad de la corriente i_T ; b) dirección del recorrido de la malla. De acuerdo con la regla de las mallas $i_T R_{1234} + i_T r_0 = \varepsilon \Rightarrow i_T = 2,94A$

- e. Una vez obtenidas todas las incógnitas referidas al circuito de combinación más simple, se reconstruye el circuito original paso a paso, para obtener en cada caso los valores de las intensidades y las diferencias de potenciales.

- f. Aplicando la Ley de Ohm: entre los puntos C y D

$$V_{1234} = i_T R_{1234} = 7,06V \Rightarrow V_{1234} = V_{123} = V_4$$

- g. Entre los puntos C y B $i_{123} = \frac{V_{123}}{R_{123}} = 1,18A \Rightarrow i_{123} = i_1 = i_2$



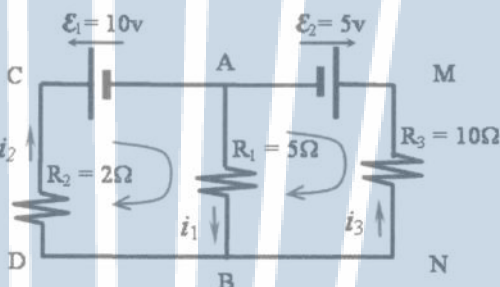
- h. Entre los puntos A y B $V_{23} = i_{23} R_{23} = 2,36 \text{ v} \Rightarrow V_{23} = V_2 = V_3$
 Finalmente, se obtiene la incógnita $i_3 = \frac{V_3}{R_3} = 0,59 \text{ A}$

3.- Resolución de una red eléctrica sencilla aplicando las Reglas de Kirchhoff

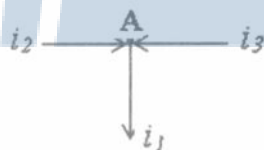
Se muestra en la figura una red eléctrica sencilla en la cual para simplificar, aún más, se emiten las resistencias internas de las baterías.

Procedimiento: Observar la figura

- Se ubican los nudos A y B;
- Se dibujan los sentidos de las corrientes (flechas i_1 , i_2 e i_3) en forma arbitraria, donde cada corriente debe iniciarse en un nudo y terminar en el otro



- i_1 , sale de A y llega a B
 - i_2 , sale de B y llega a A
 - i_3 , sale de B y llega a A
- Se separa el circuito en dos mallas: ABDCA y AMNBA recorridas en forma positiva como se indica con el arco direccionado. Observar que de acuerdo con estos recorridos positivos $\varepsilon_1 < 0$ y $\varepsilon_2 > 0$
- Aplicación de la Regla de los Nudos. En el nudo A, arbitrariamente le asignamos el signo positivo a las intensidades, que llegan al nudo y negativo a las que salen. La regla prescribe que



$$\sum i = 0 \Rightarrow i_2 + i_3 - i_1 = 0 \quad (I)$$

- Aplicación de la Regla de las Mallas, en la malla ABDCA. La regla prescribe que al recorrer la malla $\sum \varepsilon = \sum Ri$

Así: $-\varepsilon_1 = R_1 i_1 + R_2 i_2$ (II)

$\varepsilon_2 = -R_3 i_3 - R_1 i_1$ (III)

- f. Al sustituir por los valores correspondientes a resistencias y fem, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones simultáneas:

$0 = i_2 + i_3 - i_1$ (I)

$-10 = 5i_1 + 2i_2$ (II)

$5 = -10i_3 - 5i_1$ (III)

- g. Aplicando la propiedad uniforme de las igualdades a II y III se obtiene:

$-5 = -10 i_3 + 2 i_2$ (IV)

- h. Despejando i_2 de I y sustituyéndola en IV queda V y III y se forma el sistema equivalente

$5 = -10 i_3 - 5 i_1$ (III)

$-5 = -12 i_3 + 2 i_1$ (V)

Cuya solución es: $i_3 = 0,19 A$; $i_1 = -1,38 A$. Sustituyendo estos valores en la ecuación (I) se calcula $i_2 = -1,57 A$

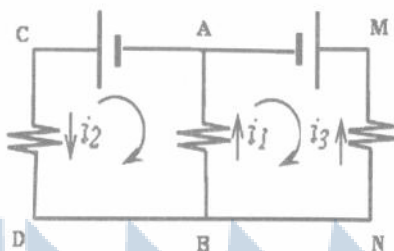
Estos resultados significan:

- i_3 se dibujó en su sentido real
- i_1 e i_2 son de sentidos opuestos al supuesto inicialmente. El esquema del circuito correspondiente a estos datos sería:

El presente esquema indica la convergencia de las intensidades al nudo A:

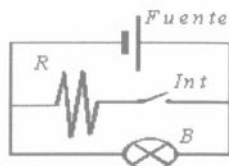
- De manera que $i_1 + i_3 = i_2$. En efecto: $1,38 A + 0,19 A = 1,57 A$

Sugerimos que se repita todo el proceso con las direcciones indicadas de forma que se verifiquen estos resultados.



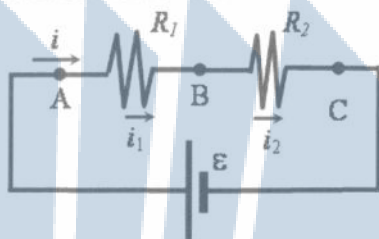
Problemas Propuestos

- En el circuito del esquema, el bombillo "B" se enciende si el interruptor está abierto, y se "apaga" al cerrarlo. Explique.



- En un circuito como el del esquema presentado, donde las resistencias R_1 y R_2 están conectadas en serie, se verifica experimentalmente las siguientes observaciones:

- La intensidad de la corriente eléctrica i , es la misma en cualquier punto del circuito exterior, es decir: $i_1 = i_2$

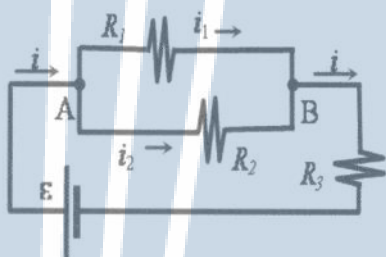


- La diferencia de potencial en los extremos AC, es igual a la suma de las diferencias de potenciales parciales, es decir: $V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$

Use estas informaciones y la Ley de Ohm para establecer que la resistencia de combinación es: $R_{AC} = R_{AB} + R_{BC}$

- En un circuito como el del esquema se verifican experimentalmente las siguientes observaciones:

- La intensidad de la corriente eléctrica i , es equivalente a la suma de las corrientes i_1 e i_2 , es decir: $i = i_1 + i_2$



- La diferencia de potencial es la misma en los extremos de R_1 y R_2

Use esta información y la Ley de Ohm para establecer que la resistencia de combinación es: $R_{AB} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3$

- En los circuitos de alumbrado, los bombillos se conectan en derivación a un voltaje común de $110V$. En estas condiciones, la experiencia muestra que los bombillos de mayor potencia brillan con mayor intensidad; por ejemplo, uno de $100W$ brilla

más que uno de $25W$. Sin embargo, si esos mismos bombillos se conectasen en serie ocurre lo contrario, es decir, el de $100W$ brilla menos que el de $25W$. Explique esta aparente contradicción.

Nota: recuerde que el brillo del bombillo está relacionado con la temperatura alcanzada por el filamento y la energía disipada en el mismo.

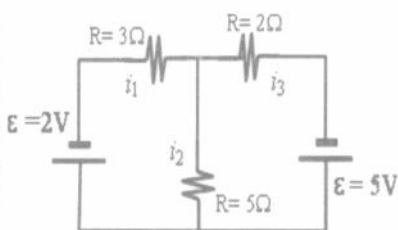
- 5.- Los cables de conexión de aparatos electrodomésticos de potencia apreciable (hornillas, calentadores) se calientan cuando éstos están en funcionamiento. Use la información de este capítulo y su intuición física para explicar el fenómeno mencionado.
- 6.- Explique por qué se usan cables más gruesos para conectar los aparatos electrodomésticos de mayor potencia, por ejemplo: hornos eléctricos y acondicionadores de aire.
- 7.- Se ha determinado que la velocidad de arrastre de los electrones libres en un conductor metálico es, en forma aproximada, de apenas $0,5 \text{ cm/s}$ ¿Cómo se explicaría, entonces, que un bombillo se encienda casi instantáneamente con la conexión del interruptor?

- 8.- Si se dispone de un circuito eléctrico como se muestra en la figura. Con fuente eléctrica y bombillo cuyo potencial máximo es de $6V$. A efectos de hacer otras conexiones se dispone adicionalmente de 5 bombillos de igual potencia.



- a. Si se le añaden uno a uno más bombillos en paralelo en los extremos A y B del circuito anterior: ¿Qué sucederá con la iluminación? y ¿Cómo explicaría ud. tal manifestación?
 - b. Si se le añaden uno a uno más bombillos en serie en los extremos A y B del circuito: ¿Qué sucederá con la iluminación? y ¿Cómo explicaría ud. tal manifestación?
- 9.- De la energía eléctrica suministrada a una lámpara solamente un pequeño porcentaje se transforma en luz. Explique qué le sucede al resto.
 - 10.- El siguiente esquema representa una red eléctrica donde se indica los valores de las resistencias y de la Fuerza electro-

motriz. Calcular el valor y determinar el sentido de las intensidades de corriente en cada resistencia, suponiendo que las resistencias internas de las baterías son mucho menores que 2Ω .



Resultado aproximado: $i_1 = 0,36A$; $i_2 = 0,61A$; $i_3 = 0,25A$.
Se omite el sentido de estas corrientes

La Red Domiciliaria de Corriente Alterna

Elementos de corriente alterna (CA)

Buena parte de los accidentes e inconvenientes surgidos en los circuitos domiciliarios son producto de descuidos y/o uso inadecuado de la corriente alterna (CA). Es común ignorar los efectos de la potencia instalada, la función de los fusibles y otros factores importantes. Aunque la corriente alterna no será tratada extensamente en este texto, por ahora examinaremos un poco la posibilidad de aplicar algunas ideas y conceptos estudiados en el ámbito de la corriente continua (CC) a situaciones reales de la circuitería de la CA.

En Venezuela la CA se ofrece al público con voltajes variables periódicamente alcanzando valores máximos y mínimos. Esta tensión corresponde a una intensidad de corriente también periódica y variable en el tiempo. Así la CA alterna aparece distinta de CC de voltajes e intensidades constantes. Sin embargo un vistazo cuidadoso al concepto de potencia eléctrica, definido antes en relación a la CC (energía disipada por unidad de tiempo) ayuda a establecer los vínculos necesarios para extender algunas ideas y relaciones del ámbito de la CC al de la CA.

Voltajes o Tensión Eficaz de la CA

Como afirmamos antes, la tensión en la CA varía constantemente. Sin embargo es posible identificarla por un número fijo: **su voltaje o tensión eficaz** (V_{ef}). Para definir este

concepto los físicos tomaron en cuenta que el efecto térmico de la CC y el de la CA sobre una resistencia R son equivalentes. En este sentido el V_{ef} de una corriente alterna es una cantidad invariable equivalente al voltaje fijo de una CC que produzca la misma cantidad de energía térmica que la CA si se consideran en el mismo lapso de tiempo. Análogo a la definición de V_{ef} , la intensidad eficaz de la CA (I_{ef}) es una cantidad constante equivalente a la intensidad de una corriente continua en el mismo lapso de tiempo originase la misma energía térmica que la corriente alterna.

En resumen, las definiciones de V_{ef} e I_{ef} significa que la potencia desarrollada en una resistencia (R) instalada en un circuito de CA es equivalente a la potencia que se obtendría en esa misma resistencia conectada a un circuito de CC cuyo voltaje fuera igual al V_{ef} de la CA. De estas consideraciones es posible inferir:

- Para una resistencia R conectada a un circuito de CC,

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

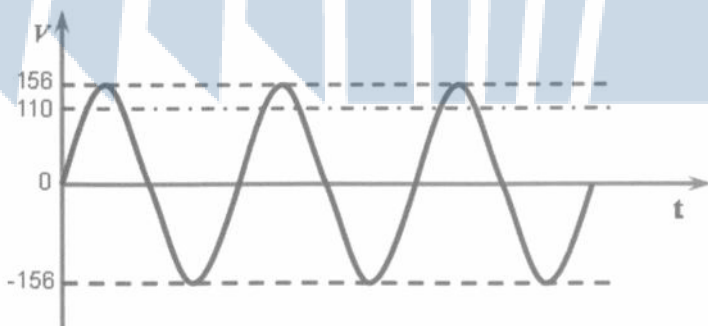
- Para una resistencia R conectada a un circuito de CA,

$$P = RI_{ef}^2 = \frac{V_{ef}^2}{R}$$

Combinando en forma conveniente estas relaciones es fácil obtener la "Ley de Ohm" para parte de un circuito de CA $V_{ef} = I_{ef} R$

A continuación, para ilustrar mejor los conceptos de I_{ef} , V_{ef} y potencia invitamos al lector a examinar los siguientes ejemplos:

1. Los 110V de la red pública significan:



Voltaje en función del tiempo

- La tensión eficaz que caracteriza esta CA es de $110V$
- La tensión suministrada por la red domiciliaria varía periódicamente entre valores máximos de $156V$, según el esquema.

- Los valores máximos fueron calculados según la fórmula

$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}, \text{ cuya deducción está fuera del alcance de este libro.}$$

- Si conectásemos a la red de $110V$ un aparato resistivo durante un determinado lapso de tiempo, se generaría tanta energía térmica como si lo hubiésemos instalado a una CC también de $110V$ en el mismo tiempo.

- ¿Qué resistencia presenta un bombillo común de potencia $50W$ y $110V$?

Informaciones pertinentes: el fabricante construye los aparatos eléctricos atendiendo al potencial de la red domiciliaria, en Venezuela es $110V$ o $220V$. Según esta información el problema es sencillo de la fórmula

$$R = \frac{V_{ef}^2}{P} = \frac{(110V)^2}{50W} = 242\Omega$$

Potencia Nominal y Potencia Efectiva

En los ejemplos precedentes el bombillo presenta una potencia nominal (indicada en el aparato) de $50W$ que corresponde a la potencia efectiva solo si se le instala a la red de $110V$. Por el contrario ¿Qué ocurriría si lo conectamos a $55V$? la potencia efectiva sería:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(55V)^2}{242\Omega} = 12,5W$$

Que es claramente distinta a la potencia nominal.

Edison y la Bombilla Eléctrica

New York 1880, noche de San Silvestre, los parroquianos acostumbrados a la tenue luminosidad de los faroles se asombran al contemplar la luz deslumbrante de 50 lámparas que iluminaron de súbito la casa de Tomás Alba Edinson. El inventor lograba así su propósito

al demostrar que podía iluminar una ciudad. La idea de obtener luz por el efecto joule no era nueva, Sir Joseph Swan lo había logrado años antes; hizo pasar corriente por una resistencia aislada en un bulto de vidrio y consiguió encenderla por breve tiempo. Sin embargo su lámpara no resultó práctica ni económica.

Pese a no poseer estudios académicos en ciencias, al punto de reconocer que no comprendía bien la Ley de Ohm y que los números no eran su fuerte, Edison con una gran dosis de tesón, perseverancia y creatividad, logró, después de arduo trabajo que un hilo de algodón carbonizado conectado a la corriente eléctrica ardiera al blanco por más de 45 horas dentro de una ampolla de cristal puesta al vacío. ¡¡Había tenido éxito!!

Ejercicios Resueltos:

1. Instalación eléctrica casera

El ingeniero de construcción civil debe tomar en consideración, entre otros aspectos de la vivienda que va a construir, los relacionados con las instalaciones eléctricas. Para ello requiere conocer cuáles son los dispositivos o equipos electrodomésticos que podrían ser usados en dicho recinto; además de conocer las condiciones óptimas de funcionamiento (potencia) que su fabricante ha determinado para su máximo rendimiento. Con esta información se procede a elaborar el plano o croquis de la instalación; a efecto de ser más preciso, a continuación se plantea una situación problema y se indican algunos pasos para su realización.

Corriente Máximas Permitidas para Conductores según su Construcción (Cables de cobre 25°C)

Calibre AWG	Amperaje Máximo (A) (USE, THW, TW, THWN)	Diámetro (mm)
2	124	7,41
4	92	5,87
6	70	4,71
8	54	3,26
10	32	2,58
12	22	2,04
14	16	1,62

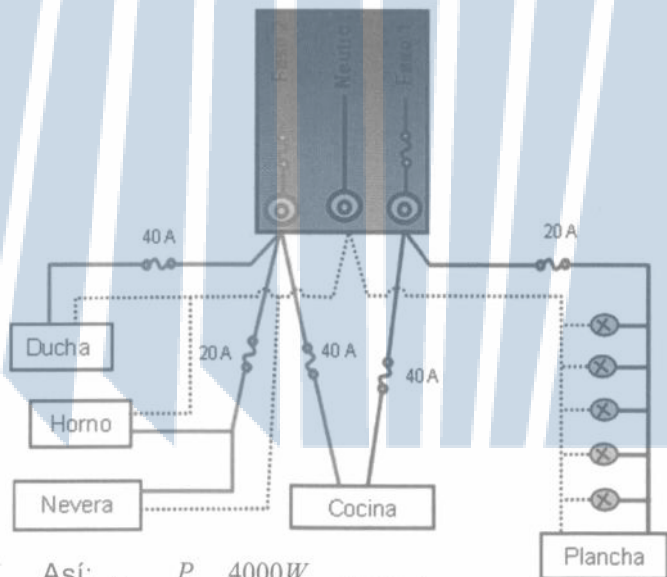
Tomado de Enalmex (2004)

En un apartamento hay por instalar 12 bombillos, una cocina eléctrica, una ducha, una nevera, una plancha eléctrica y un horno, los cuales poseen una suma de potencia de $16000W$; a demás se dispone de una alimentación eléctrica de dos líneas de $110V$ c/u.

- Si se usa un solo circuito, un accidente afectaría a todo el sistema. Si, se optara por usar cables de mayor diámetro

(como el que se usa para las cocinas eléctricas), el costo sería elevado y poco práctico.

- Entonces, lo procedente es diseñar redes eléctricas de costos más bajos y con mínimo riesgo, de tal manera que lo procedente sería separar el sistema en circuitos independientes.
- El primer circuito sería el de la cocina eléctrica ($8000W$), con la conexión a una línea de $220V$. Así, tendríamos $I_{ef} = \frac{P}{V} = \frac{8000W}{220V} = 36,36A$. En este caso se usaría un breaker o fusible de $40A$, con cable principal número 8.
- En otro circuito estaría constituido por un horno eléctrico ($1000W$) y una nevera ($1000W$), conectado a una línea de $110V$. Así: $I_{ef} = \frac{P}{V} = \frac{2000W}{110V} = 18A$. Aquí se usaría un breaker o fusible de $20A$, con cable principal número 12
- Una ducha ($4000W$) tendrá su propio circuito.



$$\text{Así: } I_{ef} = \frac{P}{V} = \frac{4000W}{110V} = 36,36A$$

Se usaría un breaker o fusible de $40A$, con cable principal número 8.

- El circuito restante estaría constituido por 12 bombillos ($100W$ c/u) y una plancha eléctrica ($800W$), para dar un total de $200W$.

$$I_{ef} = \frac{P}{V} = \frac{2000W}{110V} = 18,18 A$$

Se usaría un breaker o fusible de $20A$, con cable principal número 12

En resumen: Habría cuatro (4) circuitos:

1. $40A$, con cable 8
2. $20A$, con cable 12
3. $40A$, con cable 8
4. $20A$, con cable 12

Resumen del Capítulo (Corriente Eléctrica)

Conceptualización

- ✓ Si bien clásicamente por convención la corriente se define en términos del movimiento de los portadores de corriente positivos, la Teoría Electromagnética establece que la corriente eléctrica en los conductores metálicos consiste en el movimiento complejo de los portadores de carga negativos (electrones libres)

Como se produce

- ✓ Campo eléctrico: orienta el movimiento de la nube electrónica
- ✓ Diferencia de potencial: las cargas eléctricas negativas fluyen desde V menor hacia donde V es mayor

Representación

- ✓ Convención: del polo positivo al polo negativo
- ✓ Gráfica:
 - Corriente alterna \sim
 - Corriente directa o continua $-|$

Descripción

- ✓ Los electrones libres con una tendencia de movimiento definen una corriente eléctrica
- ✓ El movimiento de las cargas eléctricas se realiza a través de un conductor metálico

Cuantificación

$$\checkmark \quad i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Unidades

- ✓ La unidad SI de la corriente eléctrica es el Ampere (A)
- ✓ $1 A = C/s = 6.25 \times 10^{18} e/s$

Efectos

- ✓ Genera un campo magnético a su alrededor
- ✓ Transporta energía potencial eléctrica
- ✓ Transforma la energía que transporta, en trabajo mecánico (torque), trabajo químico (ionización, electrólisis) y en radiación electromagnética (térmica y luminosa)

Ecuaciones

$$\checkmark \quad i = \frac{V}{R} \quad \text{y} \quad i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Utilidad

- ✓ Realiza trabajo mecánico, como por ejemplo hacer funcionar motores, gracias al efecto magnético, también denominado "torque mecánico"
- ✓ En bombillos, hornillas, calentadores de agua, etc, produce efectos luminosos y térmicos

(Circuitería)

Conceptualización





- ✓ Como su nombre lo señala, los circuitos son redes cerradas, conformadas por al menos tres elementos: fuente, resistores y cables conductores.
- ✓ Son redes capaces de contener y distribuir el campo eléctrico constante de pilas o baterías a los elementos que la conforman

Como se produce

- ✓ A través de cables conductores se logra que la energía eléctrica que alberga la fuente sea distribuida de forma rápida y eficiente a todos los elementos del circuito para ser transformada

Representación

✓ Gráfica:

- Fuente 
- Resistencia 
- Lámpara 
- Interruptor 

Descripción

- ✓ Entre los bornes de las baterías se establece una diferencia de potencial denominada fuerza electromotriz, la cual suministra energía eléctrica a todo el circuito
- ✓ En las resistencias se transforma la energía eléctrica disponible entre los bornes de las baterías, en energía mecánica, luminosa, térmica, etc.
- ✓ Tanto en las asociaciones de baterías, así como en las de resistencias, se cumple con los principios de conservación de la carga y de conservación de la energía
- ✓ La Fuerza Electromotriz es entendida como la energía eléctrica suministrada por la fuente a cada unidad de carga transportada en el circuito completo, mientras que la Diferencia de Potencial hace referencia a la energía eléctrica transformada o disipada al transportar la unidad de carga entre dos puntos determinados del circuito.

Cuantificación

- ✓ Fuerza Electromotriz: \mathcal{E}
- ✓ Diferencia de Potencial: V_{AB}

Unidades en el Sistema Internacional de medidas (SI)

- ✓ Intensidad de la corriente eléctrica (A)
- ✓ Ampere $1A = 6.25 \times 10^{18} e/s$
- ✓ Diferencia de Potencial y fem
- ✓ Voltio (V) $1V = 1,6 \times 10^{-19} J/e$
- ✓ Potencia Eléctrica
- ✓ Watt (W) $1W = 1J/s$
- ✓ Energía Eléctrica
- Joule (J) $1J=1W.s$

Efectos

- ✓ Transporta la energía eléctrica de la fuente a todos los componentes del circuito
- ✓ A lo largo del circuito, la energía eléctrica se transforma en trabajo mecánico (torque), trabajo químico (ionización, electrólisis), o en radiación electromagnética (térmica y luminosa), o entre otros efectos.

Ecuaciones

$$\checkmark \quad \varepsilon = \frac{E_s}{q}$$

$$\checkmark \quad R = \rho \frac{L}{S}$$

$$\checkmark \quad i = \frac{V}{R}$$

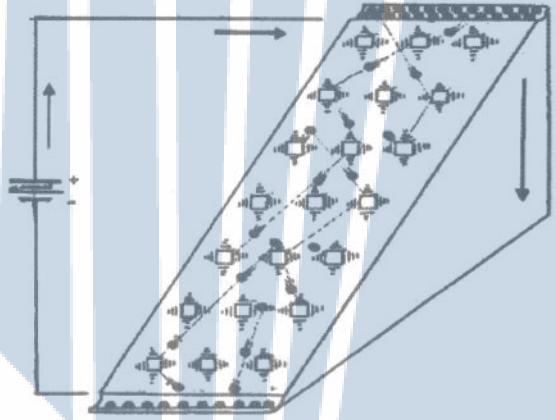
$$\checkmark \quad P = V_{AB} \cdot I = R_{AB} \cdot I^2 = \frac{V_{AB}^2}{R_{AB}}$$

Anexos

1) Un Modelo Didáctico de Corriente Eléctrica

Cuando se acciona el interruptor y se enciende la bombilla, por ejemplo podríamos pensar que por el conductor circula alguna magnitud física que produce la luz; sin embargo, lo que ocurre es imperceptible para nuestros sentidos. Frente a dificultades como éstas el hombre de ciencia diseña modelos que le ayudan a explicar y conocer mejor los hechos no observados directamente, teniendo siempre presente que el “modelo” es simplemente una forma aproximada de concebir un fenómeno y no la realidad misma. La aceptación de un modelo depende en gran medida de su potencial explicativo y su capacidad de predicción; en ciencias cuando una idea de estas no consigue discernir un fenómeno importante, se desecha o modifica, lo cual le confiere un carácter de “verdad transitoria”, mientras no aparezca otra mejor. Generalmente los modelos (teóricos o didácticos) son acompañados por analogías de orden gráfico e imágenes asociadas a conocimientos y experiencias previas que le dan significatividad y alcance.

Cónsono con este contexto teórico, para hacernos una idea de la corriente eléctrica en conductores metálicos sólidos y fenómenos afines (resistencia eléctrica, efecto térmico o de Joule, conductividad y superconductividad), imaginamos una superficie inclina-



da (tabla), con clavos igualmente espaciados, formando una estructura regular (ver figura). Supongamos, además que dejamos caer una metra entre dos filas de clavos a lo largo de la superficie; en estas condiciones es muy probable que la metra pase sin chocar, adquiera una aceleración uniforme, y a final de la tabla alcance la rapidez predicha para la caída en un plano inclinado. Ahora bien, si por el contrario la tabla fuese sometida a un movi-

veces de los electrones libres del metal; la vibración lateral de la tabla, que también hace vibrar los clavos, se correspondería con el movimiento térmico de los iones-metal que forman la red cristalina del conductor; y el grado de inclinación de la tabla se correspondería con la diferencia de potencial eléctrica entre los extremos del conductor. Agreguemos que la velocidad inicial de las metras se relaciona con el movimiento térmico de los electrones libres.

En resumen, los niveles de vibración se asocian, por una parte, con la dificultad de arrastre de las metras hacia abajo, y por otra, con la energía térmica del conductor, lo que se traduce en la *dificultad* de arrastre de los electrones al atravesar la red cristalina (Resistencia eléctrica). Es esperable, por tanto, que la velocidad de arrastre de los electrones libres, a temperatura ambiente sea mucho menor que aquella que adquieren en los superconductores, cuya temperatura es cercana al cero absoluto.

El aumento de la temperatura de los conductores metálicos, debido a la corriente eléctrica, y la disipación de energía térmica consecuente (*efecto Joule*), podría explicarse en términos del aumento de la vibración de los átomos de la red cristalina, debida a su interacción con los electrones libres, los cuales, como se indicó anteriormente, le transfieren parte de la energía cinética extra suministrada por el campo eléctrico. Por otra parte, a temperaturas muy bajas, cercanas al cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), algunos metales adquieren conductividades muy altas (resistencia casi nula), de manera que una corriente eléctrica establecida en ella permanecería sin cambios notorios igual por mucho tiempo. No obstante, que aun no está muy claro cómo ocurre esto y que su última explicación es de naturaleza cuántica, podríamos comprenderlo someramente haciendo uso del *modelo de la tabla-clavos*; en los *superconductores* los electrones libres chocan muy poco con los corazones iónicos de la estructura cristalina y se mueven con escasa oposición (resistencia casi nula), dado que éstos vibran muy poco a bajas temperatura, al igual que ocurría con las metras cuando la tabla estaba inmóvil.

Críticas al modelo: Es conveniente poner en claro que este modelo presenta limitaciones cualitativas y cuantitativas importantes, como ocurre con la mayoría de ellos. Es analogía

y, como tal, tiene la virtud de mostrar sólo una aproximación que permite insinuar sucesos equivalentes pero que, al profundizar un poco, incluyen obvias incongruencias, señal suficiente para considerar con mayor cuidado el proceso analógico, e intentar otras maneras de describir los hechos. En el modelo está claro que es apropiada la semejanza establecida entre los efectos del campo gravitatorio sobre las metras, y el del campo eléctrico sobre los electrones; no obstante, es evidente la *incompatibilidad* de escala entre las dimensiones macroscópicas de metras y clavos, y los microscópicos átomos y electrones.

Además conviene advertir que un “modelo”, por exhibir una menor complejidad que el fenómeno que explica, presenta restricciones significativas que, de cierta manera alejan los hechos de sus explicaciones.

La situación a nivel macro (donde puede hacerse medidas usuales con instrumentos de laboratorio) las magnitudes medibles serían: L, V, I, S , para obtenerlas relaciones: $R = \rho \frac{L}{S}$ y $I = \frac{\Delta V}{R}$

Sería interesante preguntarse ¿cómo se genera la fuerza que permite la generación de un campo eléctrico para que se produzca la corriente I ? (de no haber fuerza no habría corriente de deriva).

Si se pone un motor o un bombillo conectado a un circuito, se observa que el motor gira y que el bombillo se enciende. Este trabajo efectuado implica entonces que hay que hacer un trabajo equivalente sobre las cargas móviles. El fenómeno sería más evidente si la fuente energética es un generador manual: el esfuerzo efectuado se “siente” cuando el bombillo se enciende o el motor gira, pero una vez que se abre el circuito, el esfuerzo para el giro de la palanca se hace leve. Para mayor ilustración, se puede hacer la experiencia simplemente abriendo o cerrando el circuito: en el primer caso se nota la resistencia al cambio, en el segundo la operación es “suave”.

Si los acontecimientos no fuesen de esa manera, podría pensarse el caso de cargas aceleradas sin relación con el trabajo efectuado, es decir se tendría un trabajo eléctrico gratuito, violando el principio de conservación de la energía.

En resumen, la fuerza que hace aparecer la corriente deriva, es externa (una pila, generador, fotocelda, etc.), y su acción es aumentar la energía potencial sobre las cargas. Esta energía potencial por unidad de carga se le conoce como fuerza electromotriz (*fem*) y se expresa como $\mathcal{E} = \frac{\Delta U}{q}$ (esta "fuerza" no es propiamente una fuerza sino una tensión)

Pero como $\Delta U = q\Delta V$, luego (diferencia de $\mathcal{E} = \frac{q\Delta V}{q} = \Delta V$ potencial medida en voltios), con lo cual se tiene la posibilidad de establecer una corriente constante en el circuito.

Ahora bien ¿qué significa esta diferencia de potencial?

Que la totalidad de los electrones libres, presenta un desplazamiento estadístico o deriva en el sentido opuesto al del campo eléctrico, es decir, de la zona de mayor potencial a la de menor potencial.

2) Velocidad Media o Térmica de los Electrones Libres de un Metal

Dos físicos insignes, P. Drude y H. Lorentz, alrededor del 1900 concibieron la idea de "gas electrónico", basado en el Modelo Estadístico de Maxwell-Boltzmann, ya mencionado en relación con la conducción eléctrica en metal. Según la teoría de Lorentz-Drude:

- *Los electrones libres de un cristal metálico se mueven continua y caóticamente debido a su energía térmica.*
- *El conjunto de electrones libres de un metal ocupan casi todo su volumen y presentan características físicas similares a las de un gas ideal.*

Esta suposición, no obstante brillante, parece simplificar demasiado, sin embargo, ha constituido un modelo didáctico apropiado para explicar de forma elemental algunos fenómenos observados en metales y en semiconductores.

Atendiendo la definición de "temperatura absoluta (T)" y a las leyes de la teoría molecular clásica, la relación entre la energía cinética media $\left(\bar{E}_c\right)$ de las moléculas de un gas ideal y su

Aquí $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ (Carga del electrón). En adición, la intensidad de la corriente es $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, es decir $i = \frac{A\bar{v}\Delta tNe}{\Delta t}$ y, finalmente $\bar{v} = \frac{i}{ANe}$

Utilizando la expresión anterior puede calcularse el valor de la velocidad de arrastre –o velocidad media de avance– de los electrones libres para determinadas situaciones. Calculemos, por ejemplo, el valor de la velocidad de arrastre de los electrones libres en un conductor metálico de cobre, de radio igual a 1mm, por donde circula una corriente eléctrica de 20A. Recordemos para ello que el número de electrones libres por unidad de volumen en el cobre es de $8,4 \times 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3}$ y que la carga del electrón es de $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$, se tiene:

$$\bar{v} = \frac{20 \text{A}}{\pi(0,1 \text{cm})^2 (8,4)(10^2 / \text{cm}^3)(1,6 \times 10^{-19} \text{C})} = 5 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valor asombrosamente pequeño! Comparado con la rapidez térmica inicial de los electrones libres, de orden de magnitud 10^5 .

También luce curioso observar que al cerrar un circuito, inmediatamente se encienden las lámparas. Pareciera que la energía de la red eléctrica se instalara instantáneamente. Sin embargo, la teoría muestra que el campo eléctrico se establece en un conductor en forma rapidísima, pero no instantánea: lo hace con la rapidez de la luz $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, es decir 10^{12} veces mayor que la rapidez media de arrastre de los electrones libres y 10^3 veces mayor que su rapidez térmica.

La rapidez térmica de los electrones libres es 10^6 veces mayor que la rapidez de arrastre global del "gas electrónico"



Capítulo II

La evolución de la noción de **espacio** es crucial para comprender las semejanzas y diferencias entre distintas teorías físicas, pues éste es concebido como “lugar vacío, homogéneo e inocuo” en la Teoría Newtoniana, mientras que en la Teoría General de la Relatividad y en la Teoría Electromagnética adquiere características y propiedades particulares, razón por la cual es creado el concepto de **campo**. Este concepto, en conjunto con el de carga eléctrica, es fundamental para comprender la Teoría Electromagnética.

Como bien lo señalan las Teorías de Aprendizaje, los conceptos son mejor construidos en la medida en que se conoce el mayor número de atributos asociados con éstos; en vista de ello y de la importancia que tiene el concepto de **campo**, en este capítulo se presentan ideas asociadas con el origen o fuente del campo eléctrico, las diferentes maneras de representarlo gráficamente, su cuantificación y los efectos que produce. Especial énfasis se presta a la relación que tiene con conceptos tales como: flujo, circulación, energía y potencial, así como a la importancia del campo eléctrico en la comprensión de la corriente eléctrica.

Campo Electrostático

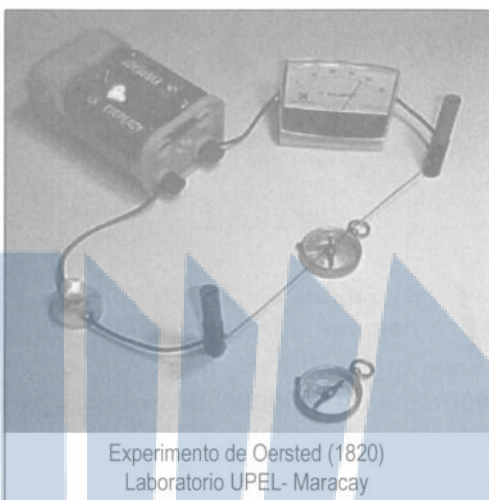
Flujo del Campo. Ley de Gauss Potencial Eléctrico

Experimento de Oersted

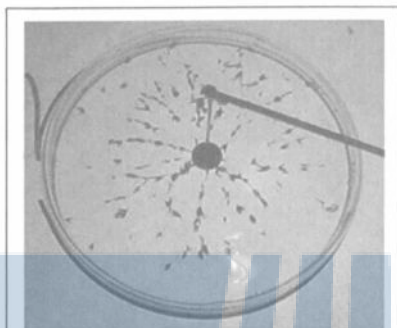
La Corriente Eléctrica (ce), su importancia, aplicaciones, así como la necesidad de producirla, manejarla y medirla, son aspectos relevantes que nos han ocupado hasta ahora. Sin embargo, para comprender y utilizar mejor el mundo natural-tecnológico que nos circunda, necesitamos adentrarnos en el estudio del efecto de movimiento que ella produce sobre una aguja magnética.

En 1820 el profesor danés Christian Oersted descubrió, en un experimento sencillo, que la corriente eléctrica altera la posición natural (N-S) de una brújula magnética cercana. Este resultado inédito abrió dos líneas de investigación trascendentes: (i) el físico francés Andrés Marie Ampere, inició estudios que mostraron que las corrientes eléctricas: interactúan entre sí; son la fuente de todo magnetismo; y se pueden medir por el efecto motor descubierto por Oersted. Ampere, siguiendo la tradición de la física de su época, al igual que Newton y Coulomb, buscó establecer la relación existente entre elementos de corriente, logrando extraordinarios resultados. (ii). El investigador inglés Michael Faraday hizo una interpretación distinta del efecto Oersted. Para él, un imán, hilo conductor o carga eléctrica **“emiten líneas de fuerza”**² que siguen un determinado patrón en el espacio.

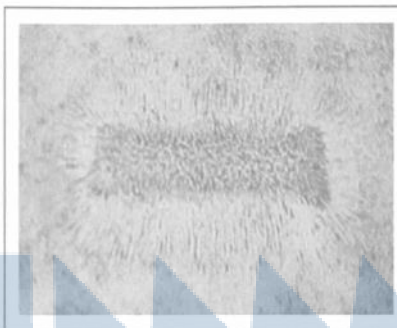
Estas ideas se ubican en el ámbito de la **“Acción Próxima”**. Tanto Faraday como Maxwell, sostenían que era necesario un mecanismo para transmitir la interacción o efecto físico de un cuerpo a otro. De alguna manera, el efecto de la corriente eléctrica que pasa por un hilo conductor se difunde al espacio fuera del alambre y se manifiesta en el giro de la brújula observado en el experimento de Oersted.



2 En lo sucesivo se empleará la expresión Línea de Campo en lugar del término Línea de Fuerza empleado por Faraday.



Fotografía de un **campo de fuerzas eléctrico** formado por semillas de césped, en un líquido aislante, alrededor de una barra simple cargada

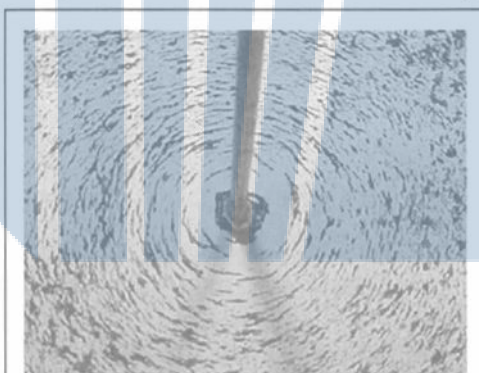


Fotografía de un **campo de fuerzas magnéticos** formado por limaduras de hierro, en el extremo de un imán recto

Las *Líneas de Campo* no fueron un invento de Faraday; antes de él se concebían como un artificio geométrico relacionado con la trayectoria que seguiría una carga eléctrica impulsada por la *Fuerza Coulombiana*, sin embargo, es Faraday quien las concibe como entes físicos reales que muestran como se propaga en el espacio el efecto de cargas eléctricas estacionarias, imanes o corrientes. Piensa además que tal efecto *no es instantáneo* sino que necesita algún tiempo para establecerse.

La observación cuidadosa de estos espectros de campos eléctricos y magnéticos coadyuvan las ideas de Faraday de un condicionamiento del espacio que rodea, bien sea a una carga eléctrica estacionaria, un imán, o a una corriente eléctrica.

Se considera importante resaltar que esta interpretación es pionera y completamente diferente a la forma de pensar de los físicos hasta ese momento, quienes se habían preocupado por la medida de las fuerzas de interacción, sin hacer referencia sustancial al espacio donde éstas se manifestaban.



Fotografía de un **campo de fuerzas magnético** formado por limaduras de hierro, en un plano perpendicular alrededor de la corriente eléctrica.

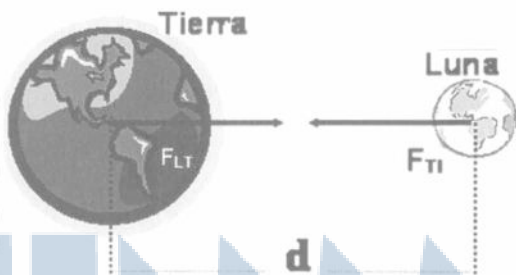
Campo Eléctrico

a) *Acción a Distancia*

Físicos como Newton y Coulomb desarrollaron sus estudios en el ámbito de la *Acción a Distancia*.

En esta concepción la interacción o acción

mutua entre dos cuerpos (masa-masa o carga-carga), se explica sin intervención de mecanismo de comunicación alguno. En otras palabras, para los seguidores de esta manera de pensar, el espacio donde suceden los fenómenos físicos *no afecta ni es perturbado* por los cuerpos que contiene.



Interacción Newtoniana como Acción a Distancia: *Todos los cuerpos masivos se atraen con la fuerza de gravitación universal sin intervención del espacio absoluto e inmutable*. Por ejemplo: interacción gravitacional Tierra - Luna.

$$|\vec{F}_{LT}| = |\vec{F}_{TL}| = G \frac{M_T M_L}{d^2} \quad (\text{Fuerza de Gravitación})$$

M_T : masa de la Tierra

M_L : masa de la Luna.

$G = 6,670 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$ = Constante de gravitación.

\vec{F}_{TL} : Obliga a Luna a girar alrededor de la Tierra.

\vec{F}_{LT} : Influencia las mareas como efecto visible de la Luna sobre la Tierra.

\vec{F}_{TL} : Es igual y de sentido contrario a \vec{F}_{LT} . (Principio de Acción y Reacción).

El espacio sólo está para contener a la Tierra y la Luna.

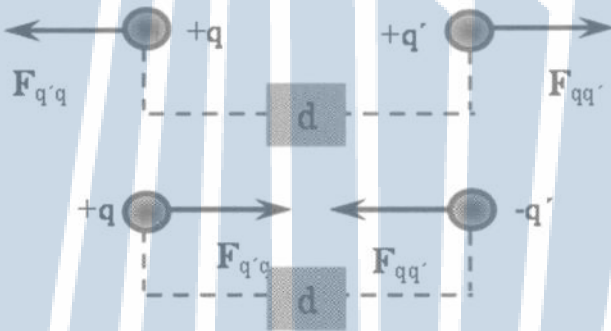
La Interacción Coulombiana como Acción a Distancia

En 1785, Charles Agustín Coulomb (1736 – 1806) hizo el estudio experimental de la interacción entre cargas eléctricas “*puntuales*” (cargas de dimensiones pequeñas en relación con la distancia de separación entre ellas). Hasta ese momento apenas

se sabía que las cargas de igual signo se repelían y las de signo contrario se atraían. Al igual que Newton, Coulomb sólo atiende a las fuerzas de interacción sin preocuparse por el espacio donde suceden los fenómenos.

Por ejemplo: Interacción electrostática entre cargas eléctricas como acción a distancia $|\vec{F}_{q'q}| = |\vec{F}_{qq'}| = k \frac{qq'}{d^2}$

q y q' son cargas eléctricas puntuales.



$$k = 8,9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} = \text{Constante de Coulomb.}$$

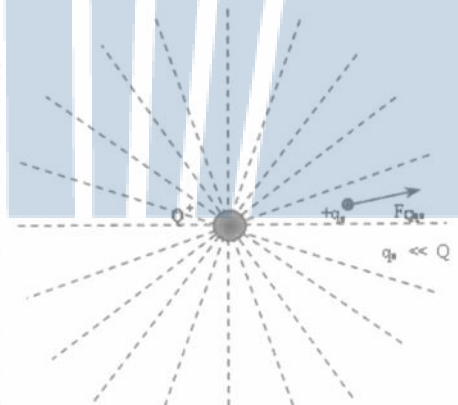
$\vec{F}_{q'q}$ es de igual dirección pero de sentido opuesto a $\vec{F}_{qq'}$.

Al igual que la interacción gravitacional newtoniana: *El espacio sólo está para contener a las cargas.*

b) El Campo Electrostático y la Fuerza de Interacción entre Cargas

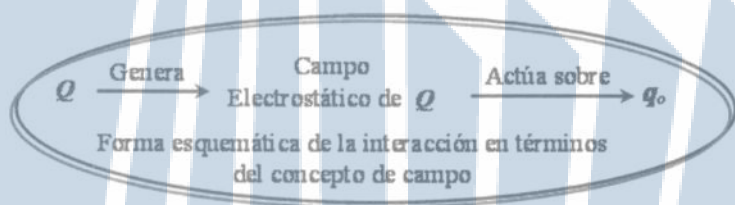
En una idea más cercana al fenómeno de la interacción entre cargas eléctricas, esquematizado con las líneas de campo que parten de Q^+ forman una estrella tridimensional.

Por otra parte, al suponer $q_o^+ \ll Q^+$, se pretende minimizar el campo de q_o^+ (carga de prueba) al compararlo con el



Sección recta de la forma del campo electrostático creado por una carga Q^+ estacionaria

de Q^+ y justificar, así, la omisión de las líneas de campo originadas por q_o^+ . Al colocar la carga q_o^+ dentro del campo electrostático de Q^+ , éste actúa sobre q_o^+ y se origina la fuerza $F_{Qq_o^+}$. En el contexto de la idea de campo de Faraday, la fuerza $F_{Qq_o^+}$ entre Q^+ y q_o^+ se entiende como consecuencia del condicionamiento del espacio en término de las líneas de campo como agente intermediario que trasmite la fuerza de una carga eléctrica a otra.



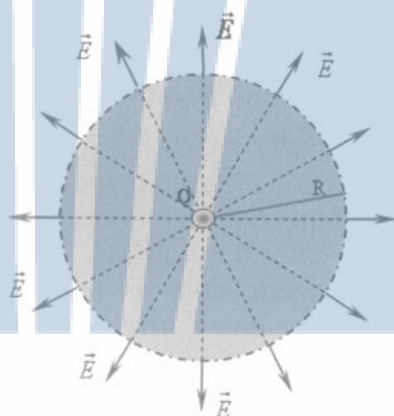
Simetría Esférica y Campo Electrostático

< Ley de Gauss

La idea de Faraday, que confiere significado físico-geométrico a las líneas observadas en los espectros formados alrededor de cuerpos electrizados, corrientes eléctricas o imanes, trasciende los fenómenos en sí y sirve de base para la descripción del campo electrostático y el electromagnético.

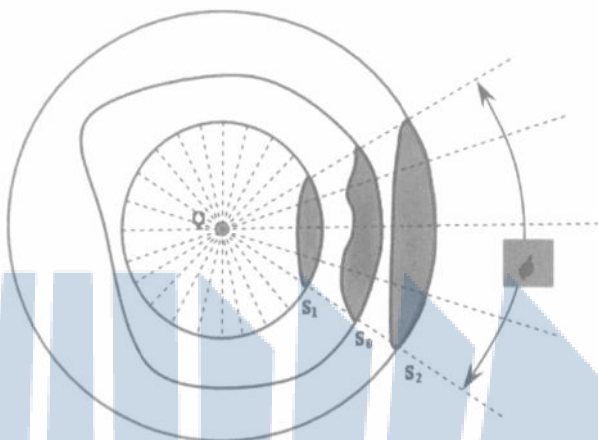
Para enriquecer el concepto de campo eléctrico examinaremos la analogía entre el espectro de líneas de campo vinculadas a una carga puntual estacionaria (pequeña en dimensiones y fija en el sistema de referencia del laboratorio) y la geometría afin consistente en esferas concéntricas con centro en la carga. Se pretende con esto representar, la forma como se establece la influencia de la carga en el espacio circundante.

Conviene destacar que este esbozo de simetría esférica connota consecuencias importantes.



Sección recta en el plano de la hoja de las líneas del campo de una carga puntual positiva

En este orden de ideas, obsérvese el esquema. Destaca que a cada ángulo sólido (ϕ) se le puede atribuir un determinado número de líneas de campo (N), igualmente espaciadas. Esto es así hasta para un ángulo que abarque todo el espacio alrededor de la carga. De esta manera, superficies como S_1 , S_2 y S_0 serán atravesadas por el mismo número de líneas de campo (N). Este hecho importantísimo da pié para un primer acercamiento al concepto básico de *Flujo del Campo Electroestático* (Φ).



Las superficies esféricas S_1 y S_2 son atravesadas por el mismo número de líneas de campo que pasan por la superficie no esférica S_0

Por otra parte, afín con las ideas de Faraday, es presumible que N depende en proporción directa de Q , es decir, $N = (\text{constante}) Q$. esta conjetura da base para definir a Φ como una cantidad constante de la siguiente manera:

$\Phi = N$; o lo que es lo mismo

$\Phi = (\text{constante}) Q$ o bien $\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} Q$

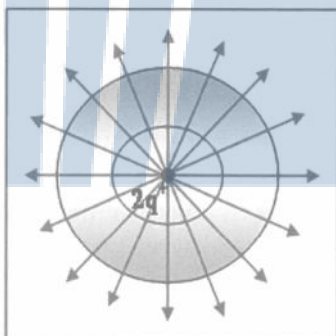
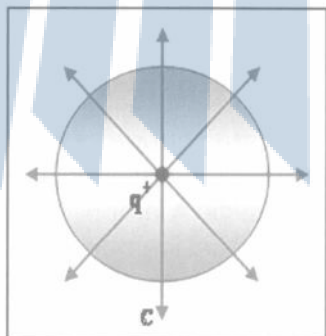
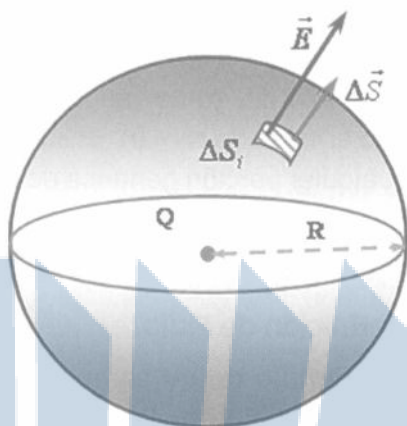


Ilustración de la proporcionalidad entre N y la carga que origina el campo.

Donde la constante ϵ_0 , se vincula al espacio donde se establece el campo y a las unidades utilizadas (ϵ_0 permitividad del espacio). Esta importante relación recibe el nombre de *Ley de Gauss*, y puede enunciarse de la forma siguiente: “El Flujo Neto de Campo Electrostático Φ , en una superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica neta encerrada en ella”.



Una mejor comprensión de la **Ley de Gauss** requiere el examen de una definición complementaria, que liga a \vec{E} con la superficie donde se calcula Φ :

En relación con esta idea, aparecen en el esquema los siguientes elementos:

- ◀ Una carga Q positiva;
- ◀ Un sector de superficie esférica ΔS ;
- ◀ El vector campo eléctrico \vec{E} con origen dentro de ΔS ;
- ◀ El vector área $\Delta \vec{S}$; también con origen dentro de ΔS .

Características de \vec{E}

Como ya fue establecido en la sección anterior, por razones de simetría \vec{E} tiene el mismo valor en todos los puntos de la superficie esférica considerada. Su dirección es radial y perpendicular a cualquier sector ΔS , muy pequeño de la superficie esférica (muy pequeño en relación con la superficie total de la esfera de radio R ($S=4\pi R^2$)), es decir $\Delta S \ll 4\pi R^2$.

Características del $\Delta \vec{S}$

$\Delta \vec{S}$ o “**vector área**”, se define vinculado a ΔS , de manera que: $|\Delta \vec{S}| = \Delta S$; $\Delta \vec{S}$ es perpendicular a ΔS , esto lo hace, en la geometría física en estudio, paralelo a \vec{E} , como se puede apreciar en la figura.

En la tarea que nos ocupa resulta esencial, además, imaginar a ΔS tan poco extensa que se le pueda atribuir sólo un vector \vec{E} y un solo $\vec{\Delta S}$ (en el lenguaje más apropiado del cálculo, se diría que el límite de $\Delta S = 0$). En la situación dibujada ΔS corresponde a cualquier porción genérica de la superficie esférica, así es posible representar al vector área como $\vec{\Delta S}_i$ y a su módulo como ΔS_i , en forma análoga la intensidad de **Campo Eléctrico** sería E_i .

Definición de Flujo

El **flujo de un campo vectorial** es un concepto del ámbito de las matemáticas que tiene un uso trascendente dentro del electromagnetismo. En un campo electrostático se define de la siguiente manera:

$$\text{Flujo} = \Phi = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \vec{\Delta S}_i$$

Notación que abarca todo el espacio alrededor de Q y consecuentemente alcanzará toda **La Superficie Esférica** en referencia. Al lector le corresponde hacer el esfuerzo de imaginar esta geometría.

Al desarrollar $\Phi = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \vec{\Delta S}_i$ se obtiene:

$$\Phi = \vec{E}_1 \cdot \vec{\Delta S}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{\Delta S}_2 + \vec{E}_3 \cdot \vec{\Delta S}_3 + \dots + \vec{E}_n \cdot \vec{\Delta S}_n \Rightarrow$$

Como $\vec{E}_i \parallel \vec{\Delta S}_i$ para todos los sectores ΔS , queda: $\vec{E}_i \cdot \vec{\Delta S}_i = E_i \cdot \Delta S_i$

Por tanto

$$\Rightarrow \Phi = E_1 \cdot \Delta S_1 + E_2 \cdot \Delta S_2 + E_3 \cdot \Delta S_3 + \dots + E_n \cdot \Delta S_n$$

Por las características de \vec{E} , ya señaladas

$$E_1 = E_2 = E_3 \dots = E_n = E$$

luego, sustituyendo a los E_i por E y factorizando queda:

$$\Phi = E (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \dots + \Delta S_n)$$

$$\Phi = ES \text{ para } S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \dots + \Delta S_n$$

Como los sectores ΔS_i abarcan toda la superficie esférica de radio R .

$$S = 4\pi R^2, \text{ luego, } \Phi = E(4\pi R^2),$$

Al comparar esta definición con $\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} q$, se obtiene el valor de $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R^2}$

Con lo cual \vec{E} queda completamente definido:

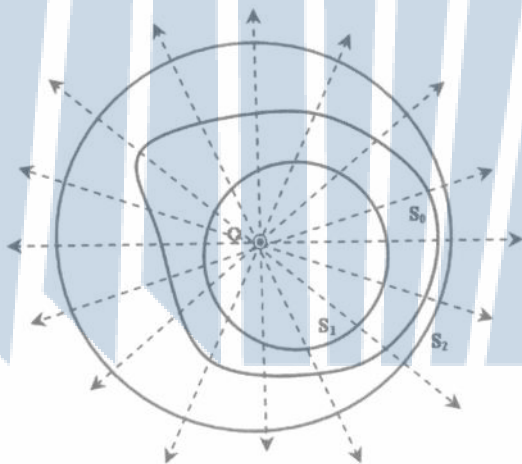
✓ Dirección: Radial en el sentido de las líneas de campo.

✓ valor: $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R^2}$

Análisis de la Ley de Gauss

La **Ley de Gauss** muestra que el flujo Φ es independiente del radio R , de la esfera considerada, eso la hace válida para cualquier esfera centrada en la carga puntual Q . Es decir, que el flujo de campo Φ , resulta el mismo para todas las superficies esféricas, cuyo centro coincida con Q .

En segundo lugar, queda claro que el flujo es proporcional a la carga Q , ubicada dentro de la superficie esférica. Si Q fuera nula Φ también sería nulo, es decir, para una superficie que no contenga carga neta alguna ($Q = 0$) el flujo sería también nulo.



Sección recta de S_1 , S_0 y S_2 en el plano de la hoja

Hasta aquí la exposición, ha restringido la **Ley de Gauss** a cargas puntuales únicas y a superficies esféricas. Sin embargo,

es posible extender su alcance, bien sea para superficies no esféricas como a cargas extensas o a varias cargas puntuales.

Para dar una idea de la primera posibilidad imaginemos la superficie cerrada S_0 , ubicada entre dos superficies esféricas cercanas, S_1 y S_2 .

En el contexto de las ideas de Faraday, el flujo de campo (Φ) equivale al número total de líneas de campo que atraviesan una determinada superficie. Si damos esto por cierto, la sola observación del diagrama, lleva a pensar que Φ es el mismo para las tres superficies en consideración. Es decir:

$$\text{flujo en } S_2 = \text{flujo en } S_0 = \text{flujo en } S_1$$

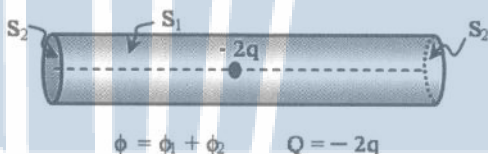
Relación que implica la validez de la **Ley de Gauss**, en una superficie no necesariamente esférica como S_0 . En segundo término, la "carga neta" mencionada en la "Ley de Gauss" se le puede interpretar bien como una sumatoria de cargas puntuales ($Q = \sum_i q_i$) o como una carga extensa o distribución de cargas.

Ahora bien, reconocemos la falta de una explicación sencilla para esto, no obstante, podríamos adelantar que cualquier entendimiento del asunto se sustentaría en el principio de superposición.

Ejemplos de aplicación de la Ley de Gauss:

1) Hallar el flujo en las siguientes situaciones, donde Q es la carga neta:

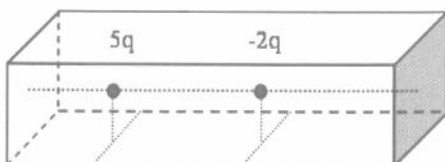
El flujo se divide en Φ_1 en la superficie S_1 , redondeada y Φ_2 , en las superficies plana de las tapas, S_2 .



Por la **Ley de Gauss**: $\Phi = 4\pi k Q = 4\pi K (-2q) = -8\pi K q$

$$Q = (5q) + (-2q) = 3q,$$

$$\Phi = 4\pi k (3q) = 12\pi k q$$

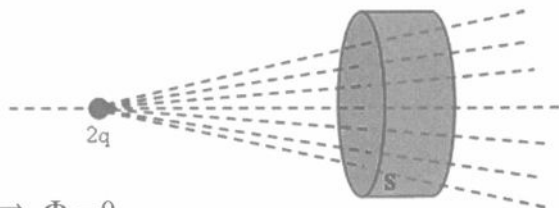


En un cilindro con cargas situadas en su exterior

Por la **Ley de Gauss** el flujo en S es

$\Phi_s = 4\pi Q$, pero Q dentro de S es

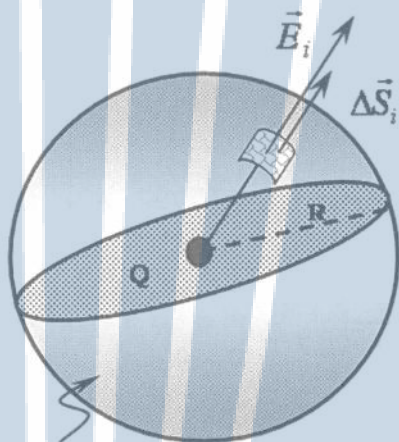
$$Q = 0 \rightarrow \Phi_s = 4\pi k(0) \Rightarrow \Phi_s = 0$$



Aplicaciones más Complejas

Obtención del campo eléctrico \vec{E} a la distancia R de una carga puntual

Para resolver este problema se selecciona una superficie esférica de radio R , entre muchas superficies cerradas posibles que encierran a Q . La escogencia de esta superficie (denominada **Gaussiana**) se justifica por la simetría esférica de este campo: los efectos eléctricos de Q son idénticos en todos los puntos del espacio equidistantes de Q por la **Ley de Gauss**.



S: Superficie esférica de radio R (Superficie Gaussiana)

$$\Phi = 4\pi kQ$$

por la definición de flujo:

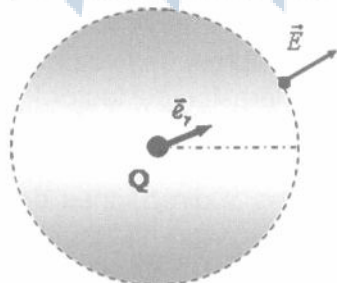
$$\Phi = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i$$

Tomando en cuenta que en todos los sectores ΔS de S ; \vec{E} presenta un mismo valor E y también que $\vec{E}_i \parallel \Delta\vec{S}_i$ la igualdad anterior se transforma en:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \vec{E} \cdot \Delta\vec{S}_i = \sum_{i=1}^n E \cdot \Delta S_i \cos 0^\circ$$

por lo que resulta: $\Phi = E \sum_{i=1}^n \Delta S_i$ En el

entendido que $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ abarca toda la



superficie esférica de radio R , así:

$$\Phi = E \cdot (Superficie \text{ de la esfera de Radio } R) \quad \Phi = E(4\pi R^2).$$

Finalmente, igualando las dos expresiones de Φ , se tiene que

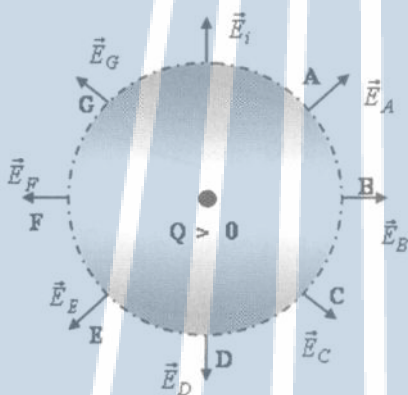
$$E(4\pi R^2) = 4\pi kQ$$

$$\text{Simplificando y despaajando queda: } E = \frac{kQ}{R^2} \text{ o también}$$

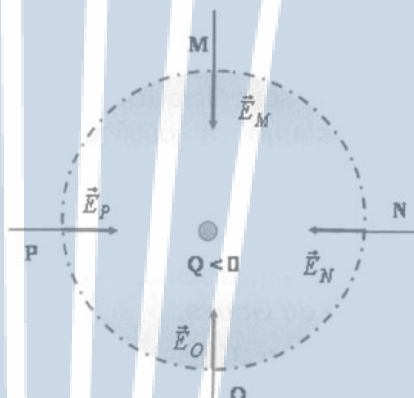
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$$

Además, en cada sector de la esfera \vec{E} , tiene dirección radial (se orienta según las líneas de campo).

$\vec{E} = \frac{kQ}{R^2} \vec{e}_r$; donde \vec{e}_r es un vector unitario en la dirección radial dirigido hacia afuera de la esfera.



Representación de \vec{E} para ocho puntos de la superficie esférica para $Q > 0$



Representación de \vec{E} en cuatro puntos de la superficie esférica para $Q < 0$

Vector del Campo Eléctrico a una Distancia R , de una Varilla muy Larga Cargada Uniformemente (Línea muy larga de carga).

Sobre el significado de expresiones y palabras, una vez más se recurre a esquemas que ayuden a la comprensión del lector.

Para este caso:

- ✓ El vector campo se refiere a los valores y direcciones del campo eléctrico en el espacio alrededor de cargas distribuidas uniformemente en una línea recta.

- ✓ La distribución uniforme de carga tiene que ver con la homogeneidad, es decir, que la densidad lineal de carga es la misma en cualquier sector de la varilla.
- ✓ La densidad lineal de carga (λ) se define como cantidad de carga en cada unidad de longitud.

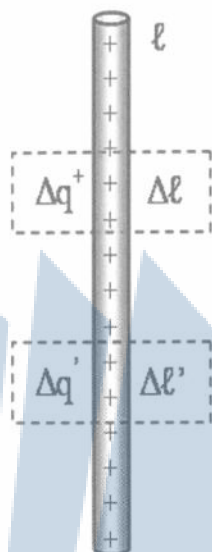


Ilustración de conceptos e ideas:

- Densidad lineal de carga: (λ)

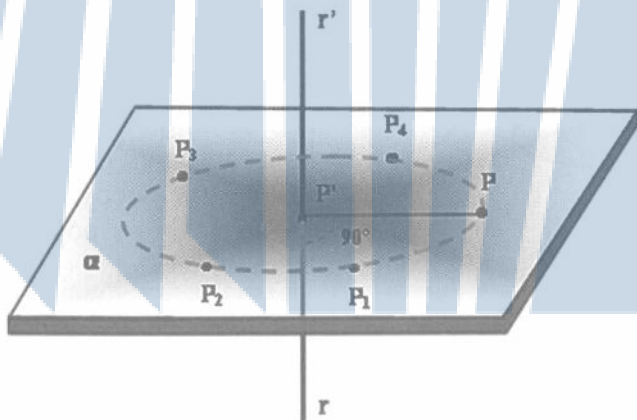
$$\lambda' = \frac{\text{Cantidad de } q}{\Delta \ell'} \quad \text{y} \quad \lambda = \frac{\text{Cantidad de } q}{\Delta \ell}$$

- Distribución uniforme de carga significa

$$\lambda = \frac{\Delta q}{\Delta \ell} ; \text{ como } \lambda = \lambda' \text{ entonces, } \lambda = \frac{\Delta q'}{\Delta \ell'}$$

Simetría Cilíndrica

En primer lugar sería interesante acercarnos al significado de la frase “igual distancia, igual efecto” cuando se trata de una “línea muy larga de cargas”. Para la geometría la distancia de un punto (P) de una recta, rr' es la medida de la línea perpendicular trazada de P hasta rr' .

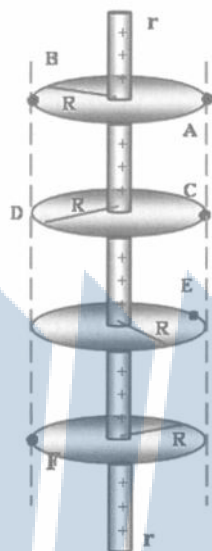
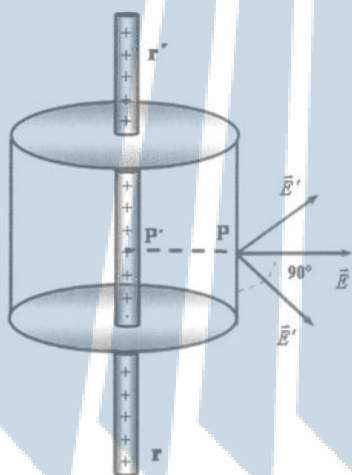


La longitud de $P P'$ es la distancia de P a la recta rr' . En la circunferencia centrada en P' y ubicada en el plano α perpendicular a rr' , los puntos P_1, P_2, P_3, P_4 y todos puntos de esa curva **Equidistan de la Recta rr'** .

Este dibujo ayuda a comprender el significado de la expresión “igual distancia a una recta dada”. Todos los puntos de la superficie que forma la capa lateral del cilindro del dibujo, como por ejemplo: los puntos A, B, C, D y F equidistan de rr' . En geometría la recta rr' se denomina “Eje Principal de Simetría del Cilindro”.

Igual Distancia, igual Efecto

En el siguiente esquema se hace coincidir la línea larga de carga con el eje principal del cilindro. En esta situación, la dirección del campo eléctrico en un punto cualquiera (P) de la superficie cilíndrica es necesariamente \vec{E} . Las direcciones



Cilindro de radio R con circunferencias perpendiculares también de radio R.

\vec{E}' ; \vec{E}'' o cualquiera otra indicaría una tendencia o predominio de la influencia de las cargas ubicadas hacia arriba o hacia debajo de P' en contradicción con idea básica de “igual distancia, igual efecto”, esto porque P' , siempre será considerada como el centro de la línea de carga. La línea de carga es tan larga como sea necesario para que P' quede en el centro (con un poco de imaginación e intuición física es posible aceptar esta idea).

Campo a la Distancia R de la Línea de Cargas de Densidad

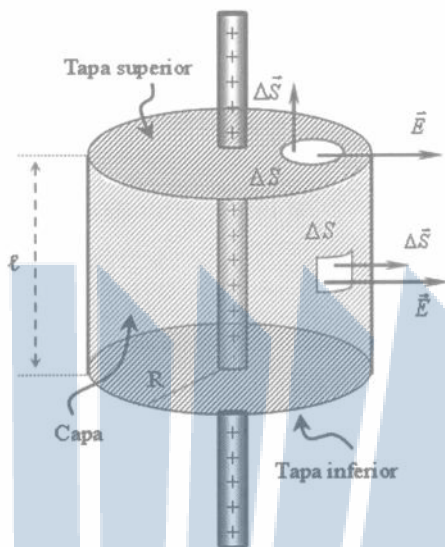
$$\lambda = \frac{Q}{\ell} \text{ para cualquier } \ell \neq 0$$

Las propiedades físicas y geométricas del espacio circundante a una línea muy larga de cargas sustentan las siguientes afirmaciones:

a.- $\vec{E} \perp \Delta\vec{S}$ en todos los sectores, ΔS de las tapas del cilindro;

b.- $\vec{E} \parallel \Delta\vec{S}$ en todos los sectores ΔS de la capa del cilindro;

c.- \vec{E} tiene el mismo valor en todos los sectores ΔS de la capa del cilindro (igual distancia igual efecto).



Cálculo del Flujo de Campo Eléctrico en la Superficie del Cilindro

El cilindro del esquema anterior muestra tres superficies:

< Superficie de la Capa = $2\pi Rl$;

< Superficie de la Tapa inferior = πR^2

< Superficie de la Tapa superior = πR^2

Para calcular el flujo en la superficie cilíndrica en estudio había que tomar en cuenta las 3 superficies.

Flujo en la Capa del Cilindro, Φ_C

$\Phi_C = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S} = E \sum_{i=1}^n \Delta S_i$, donde $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ es la superficie de la capa.

$$\text{Así: } \Phi_C = E (2\pi R l)$$

Flujo en la Tapa Superior, Φ_{TS}

$\Phi_{TS} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i = 0$; dado que $\vec{E}_i \perp \Delta\vec{S}_i$. Igualmente en la tapa

inferior: $\Phi_{TI} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i = 0$

Flujo en la Superficie del Cilindro, Φ

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_{TS} + \Phi_T = \Phi_c$$

$$\Phi = 2\pi R \ell E$$

Por otra parte, según la **Ley de Gauss**:

$$\Phi = 4\pi k Q \quad \text{al comparar estos resultados}$$

$$4\pi k Q = 2\pi R \cdot \ell \cdot E$$

$$E = \frac{2kQ}{R\ell} = \frac{2k}{R} \left(\frac{Q}{\ell} \right)$$

Como Q , en la **Ley de Gauss**, está contenida dentro del cilindro de longitud ℓ , $\lambda = \frac{Q}{\ell}$ densidad lineal de carga, así finalmente:

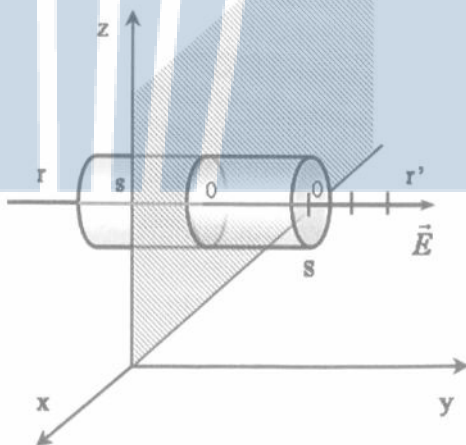
$$E = \frac{2k\lambda}{R} \rightarrow E \text{ es proporcional a } \frac{1}{R} \text{ o también}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2\lambda}{R} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R}$$

Recordemos, además que \vec{E} , tiene dirección perpendicular (o radial) en relación a línea de carga. En casos como este se habla de **Simetría Cilíndrica**.

Campo de una Carga Distribuida en una Placa Plana Delgada muy Amplia

En este caso la carga se considera uniformemente distribuida en una placa plana delgada muy amplia, de modo que cabe la definición de densidad superficial de carga como: $\sigma = \frac{Q}{S}$, para cualquier tamaño de $S \neq 0$ dentro de la cual se encuentra la carga Q .



Las nociones de simetría examinadas en este capítulo, parecen suficientes para visualizar y comprender que los efectos eléctricos de la placa de cargas deben ser idénticos sobre los puntos de cualquier plano paralelo al (xz) de la carga.

La recta r' es perpendicular al plano (xz). En concordancia con esta conclusión es importante resaltar que un punto como (0), del dibujo siempre estará en el centro de la placa por ser ésta tan extensa como sea necesario para que el punto en referencia sea el centro (con un tanto de imaginación es posible entender la afirmación anterior).

Por esta razón el campo eléctrico \vec{E} , dibujado sobre la superficie S , tiene el mismo valor en todos los puntos de ésta y es perpendicular a la misma; cualquier dirección distinta a la indicada implicaría una tendencia de mayor efecto de un sector de la placa de carga sobre otro, en contradicción con la simetría antes descrita. La simetría de la situación física mostrada en el dibujo proporciona argumentos suficientes para establecer las siguientes relaciones:

Sea Q la cantidad de carga contenida en el sector de superficie S , común al cilindro y a la placa de carga. $\sigma = \frac{Q}{S}$

- El flujo en la capa del cilindro es cero.
- El flujo en la tapa derecha es (ES) idéntico al de la tapa izquierda.
- El flujo de campo eléctrico total para el cilindro es $\Phi = 2ES$

Por la **Ley de Gauss**

$$\Phi = 4\pi k Q \rightarrow 2ES = 4\pi k Q$$

$$E = \frac{2\pi k Q}{S} \quad E = 2\pi k \sigma \quad \text{o también} \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Es interesante que E en un punto, enfrente de la placa sea independiente de la distancia a la misma. Resaltamos también que \vec{E} es perpendicular a la placa de carga.

Ley de Gauss y la Ley de Coulomb. Relación entre K la constante de Coulomb y la permitividad del espacio ϵ_0

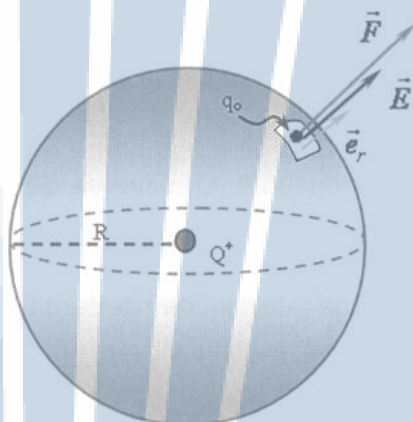
Al examinar de nuevo la situación física precedente, supóngase, además, una carga $q_0 \ll Q$, positiva situada en el punto P de la superficie esférica de radio R.

Como ya fue expresado en este capítulo, Coulomb interpretó la interacción entre Q y q_0 como una "Acción a distancia", sin referencia alguna al concepto de Campo. Así la fuerza \vec{F} que actúa sobre q_0 es: $\vec{F} = k \frac{Q q_0}{R^2} \vec{e}_r$;

siendo \vec{e}_r , el vector unitario de dirección radial.

Por otra parte, en el ámbito de la teoría del campo, el efecto de Q se extiende al espacio circundante y se manifiesta en cada punto (en particular en P) en términos del vector campo \vec{E} ; así:

$$\vec{E}_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \vec{e}_r$$



Es sencillo comparar estas dos relaciones, en efecto, de la fórmula de Coulomb $\frac{\vec{F}}{q_0} = k \frac{Q}{R^2} \vec{e}_r$, además $\vec{E}_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \vec{e}_r$.

De aquí, si igualamos las constantes: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, queda $\vec{E}_p = \frac{\vec{F}}{q_0}$,

que puede considerarse una definición operacional de \vec{E}_p como "fuerza actuando sobre cada unidad de carga eléctrica positiva colocada en P".

Unidades De \vec{E}_p y Cálculo de ϵ_0 .

De $\vec{E}_p = \frac{\vec{F}}{q_0}$, la unidad SI de \vec{E}_p es $\frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb}} \rightarrow \left(\frac{N}{C}\right)$. Del

valor de k

$k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ y dado que $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$, queda

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

Tomando en cuenta la relación entre k y ϵ_0 en la **Ley de Coulomb** se expresaría así:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_0}{R^2}, \text{ donde } R \text{ es la distancia entre } Q \text{ y } q_0.$$

Profundización del Tema

Ley de Gauss

En la obtención de la **Ley de Gauss**, se ha establecido que el **Flujo del Campo Electroestático** alrededor de una carga Q

está dado por: $\Phi = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i = 4\pi k Q$. Para ello se supuso ΔS_i

“muy pequeño” de manera que a cada uno le correspondiera sólo un \vec{E} . Ahora bien, ese ΔS_i presenta ambigüedad por cuanto la frase “muy pequeño” se presta a diversas interpretaciones. Para solventar este inconveniente, el lenguaje matemático ofrece el concepto del “límite” donde “muy pequeño” se sustituye por la expresión **“Límite de la Variable ΔS es cero”** o también:

$\text{Lim } \Delta S = 0$ que dentro del cálculo significa: $|\Delta S - 0| < \epsilon$ para el número real $\epsilon > 0$ y arbitrario, es decir, positivo y del valor que nos de la gana.

Por ejemplo: $\epsilon = 10^{-6} = 0,000001 \Rightarrow \Delta S < 0,000001$

¡Claro que por ser ϵ arbitrario podría valer 10^{-100} !, o menos aún, esto resulta un poco complicado, pero mucho es más

preciso. Es interesante observar como $\sum_{i=1}^n E \Delta S_i$ aumenta el

número de sumandos a medida que ε sea menor. Así el número de sumandos alcanzaría a ser mayor que cualquier número por grande que parezca. Esta suma se interpreta en el cálculo con el signo “integral” (\int), y la matemática correspondiente ofrece métodos para calcularla. Finalmente, con este lenguaje, la

$$\text{situación queda: } \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \vec{E} \cdot \Delta \vec{S}_i = \int_{\text{Toda la Superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Así, dentro de las condiciones físicas ya explicadas:

$$\Phi = \int_{\text{Toda la Superficie}} E \cdot ds = \int_{\text{Toda la Superficie}} E \cdot ds \cos 0^\circ, \text{ como } E \text{ es constante}$$

$$\Phi = E \int_{\text{Toda la Superficie}} ds = E 4\pi R^2$$

$$\text{Aquí, } \int_{\text{Toda la superficie}} ds = \text{Superficie de la esfera de radio } R$$

y finalmente, $\Phi = 4\pi kQ$ expresión que corresponde a la **Ley de Gauss**.

Potencial de un Campo Electroestático

En la sección anterior se caracterizó el campo electrostático, de una carga eléctrica puntual, mediante el campo de vectores \vec{E} . Sin embargo, una descripción más completa de los fenómenos electrostáticos requiere un concepto complementario “Potencial del Campo (V)”. El potencial del campo (V) resulta ser una magnitud escalar que encarna las propiedades energéticas del campo.

Energía Potencial (E_p)

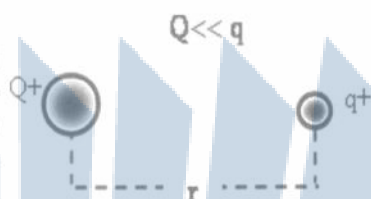
En general la E_p de un sistema físico de dos cuerpos en interacción es una magnitud escalar que depende de su posición relativa. Por ejemplo, al sistema estelar Tierra-Luna se le atribuye la energía potencial

$$E_p = -G \frac{M_T M_L}{d}$$

G = constante de gravitación universal
 M_T = masa de la Tierra
 M_L = masa de la Luna
 d = distancia entre los centros de la Tierra y la Luna

En adición, la energía potencial de un sistema físico se refiere a la energía almacenada en él, producto de la energía empleada por un agente externo para configurarlo. Por ejemplo, en el sistema dinámico Tierra-Luna se supone que la energía potencial corresponde a la empleada para formarlo. Viceversa, se necesitaría igual cantidad de energía para desprender la Luna de la Tierra.

Analicemos, en este orden, el sistema físico formado por dos cargas eléctricas puntuales Q mucho mayor que q , situadas a una distancia r , dentro de las ideas que venimos desarrollando, tiene sentido aceptar que hubo un agente físico externo que invirtió determinada cantidad de energía para colocarlos en esa posición, venciendo la repulsión coulombiana recíproca. El proceso que llevó a las cargas Q y q , a la posición mostrada en el esquema puede imaginarse de la siguiente manera: Q estaba fija desde el comienzo y la energía invertida para vencer la repulsión sirvió para colocar a q en el punto p del campo eléctrico formado por Q . En este contexto es usual atribuirle a q esa energía y denominarla energía potencial de q (E_p), producto de su interacción con el campo generado por Q .

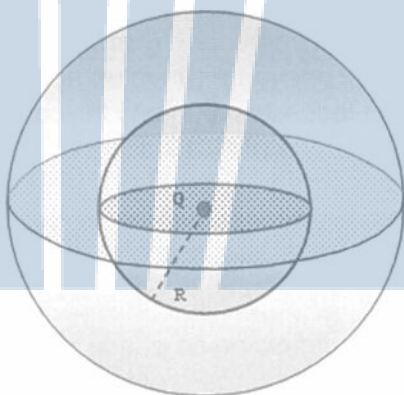


Q estaba fija desde el comienzo y la energía invertida para vencer la repulsión sirvió para colocar a q en el punto p del campo eléctrico formado por Q . En este contexto es usual atribuirle a q esa energía y denominarla energía potencial de q (E_p), producto de su interacción con el campo generado por Q .

Potencial V_p en un Punto p del Campo Electroestático

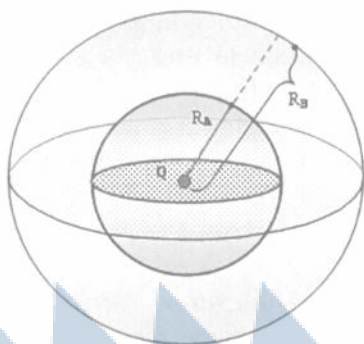
Este concepto se define según la siguiente relación $V_p = \frac{E_p}{q}$.

De esta manera V_p representa la energía que necesitaría invertir un agente físico externo para colocar una unidad de carga eléctrica en el punto p del campo electrostático de Q ; sin embargo este potencial existe independientemente que se coloque la carga q en el punto p , de esta manera podríamos afirmar que V_p es un propiedad intrínseca del campo de Q .



Superficies Equipotenciales

Al igual que se hizo para establecer el concepto de intensidad de campo eléctrico, imaginemos el campo electrostático generado por una carga $Q+$ y una familia de superficies esféricas centradas en Q .



Por otra parte, las propiedades de simetría esférica del campo electrostático de una carga puntual, estudiadas en la sección anterior y sobre todo la frase guía “igual distancia, igual efecto” dan base para aceptar y comprender que el valor del potencial eléctrico debe ser el mismo en todos los puntos de una superficie esférica de radio r centrada en Q . Por obvia razón, estas formas geométricas se denominan **Superficies Equipotenciales**.

Diferencia de Potencial

Es claro que entre los puntos de una misma superficie equipotencial la diferencia de potencial es nula. También es sencillo de entender que entre dos puntos ubicados en superficies equipotenciales distintas debe haber una diferencia de potencial distinta de cero.

Examínese las superficies equipotenciales esféricas de radio R_A y R_B . Supóngase, además como estrategia didáctica, el traslado de una carga $q \ll Q$ entre los puntos A y B . Los elementos físicos más relevantes involucrados en este proceso son: \vec{E} existente en todos los puntos del campo, $\Delta\vec{R}$, o vector desplazamiento entre A y B , y la diferencia de potencial entre los dos puntos antes señalados ($V_B - V_A$). Estas condiciones parecen suficiente para definir la diferencia de potencial entre A y B , como sigue:

$$V_B - V_A = - \sum_{i=1}^n \vec{E} \cdot \Delta\vec{R}_i = - \sum_{i=1}^n E \Delta R_i \cos 0^\circ = \sum_{i=1}^n E \Delta R_i. \quad \text{A partir de}$$

esta definición se puede probar que $V_B - V_A$ es una magnitud escalar que encarna propiedades energéticas, cuyo valor resulta independiente de la trayectoria seguida por la carga q al trasladarse entre A y B . Resaltamos que el término ΔR_i refiere a un trozo del valor del desplazamiento total ΔR mucho menor que éste. Esta consideración se justifica porque en el producto $\vec{E} \cdot \Delta\vec{R}_i$ se estima

en forma aproximada, que E no cambia a lo largo de $\Delta\vec{R}_i$. El cálculo de la sumatoria que aparece en la definición anterior no es inmediato dado que E es una función inversa de R^2 y varía entre un valor máximo en A y un mínimo en B , dado que $R_A < R < R_B$. Una forma sencilla de subsanar este problema es sustituir la distancia

variable R por su valor medio cuadrático $R = \sqrt{R_A R_B}$. Así se obtiene un valor medio para \vec{E} : Así $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R_A R_B}$, cantidad ésta

que se considera constante a lo largo de todo el desplazamiento ΔR . De esta forma:

$$V_B - V_A = -\sum_{i=1} \vec{E} \Delta R_i \Rightarrow V_B - V_A = -\vec{E} \sum \Delta R_i$$

$$V_B - V_A = -\vec{E}(R_B - R_A) \Rightarrow V_B - V_A = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_A R_B} (R_B - R_A)$$

$$V_B - V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_A} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_B} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_A}$$

para que esta igualdad sea siempre válida es necesario que

$$V_B = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_B} \text{ y } V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_A}. \text{ Hemos llegado a este}$$

resultado considerando dos puntos específicos ubicados en la misma dirección radial, no obstante, la relación obtenida es generalizable para todos los puntos de las esferas examinadas así como para dos superficies equipotenciales cualesquiera. En

síntesis se llega a la definición $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R}$, donde se muestra que V es una función que depende solo de la variable R .

Análisis del Concepto de Potencial del Campo Electrostático

De la definición $V_p = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_p}$, se derivan consecuencias importantes:

- ✓ V_p es una función que depende sólo de la distancia R_p entre la carga Q que genera el campo y el punto p considerado.

- ✓ Las superficies esféricas de radio R centradas en Q , son equipotenciales.

- ✓ La diferencia de potencial entre dos puntos A y B del campo

$$V_B - V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_A} \right)$$

depende sólo de R_A y R_B , por tanto es independiente del camino seguido para trasladar una carga $q \ll Q$ entre ellos. Esta propiedad caracteriza el campo electrostático como "**Conservativo**".

- ✓ Se puede imaginar el traslado de una carga $q \ll Q$ (supuesta Q fija) desde un punto A , muy alejado de Q hasta el punto B ; de forma que $R_A \gg R_B$. Esta condición haría el potencial

$$V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_A}$$

se ha movido desde un punto de potencial $V_A = 0$ al potencial V_B con un valor apreciable. En este orden

$$V_B - V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_A} \right) \quad \text{se transforma en} \quad V_B = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_B}$$

que representa, en otras palabras, la energía invertida por un agente externo para trasladar una unidad de $q \ll Q$ desde un punto A de potencial $V_A = 0$ a otro punto B , cercano a Q , de potencia V_B con valor apreciable.

Ahora bien, si recordamos la definición de Energía Potencial, se puede afirmar que q colocada en el punto B del campo de Q posee una E_p por su interacción con éste. Así

$$V_B = \frac{E_p}{q} \Rightarrow E_p^q = Vq_B, \quad \text{por la fórmula anterior} \quad E_p^q = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_B},$$

que es la energía potencial atribuible a q debido a su interacción con el campo que genera Q .

- ✓ Para el caso del campo eléctrico de una carga Q puntual, las superficies equipotenciales, son superficies esféricas centradas en Q . En adición, las líneas de campo son radiales. Al juntar estas informaciones resulta que las líneas de campo resultan normales o perpendiculares en todo punto a las superficies equipotenciales.

De la definición, si A y B están en una misma superficie equipotencial $V_A - V_B = -\sum \vec{E} \cdot \Delta \vec{R}$, $V_A - V_B = 0$

- ✓ En un análisis dimensional sencillo se prueba que el potencial se expresa en unidades de energía por unidad de carga.

En efecto $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R}$. Al usar $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ y

expresando todas las unidades en el SI, se obtiene V en $\frac{J}{C}$.

Por otra parte, dado que el Campo \vec{E} para un punto determinado del espacio, debido a varias cargas puntuales, Q_1, Q_2, \dots, Q_i es $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_i$; también el potencial correspondiente para un punto cualquiera es la suma de los potenciales individuales, es decir, $V = V_1 + V_2 + \dots + V_i$

Cuestionario de Revisión de Conocimiento Potencial Eléctrico y Campo Eléctrico

1. Obtenga la expresión del flujo del campo eléctrico creado por una carga puntual Q en una superficie esférica de radio R , en los siguientes casos:
 - ❖ Q está en el centro de la esfera.
 - ❖ Q está fuera de la esfera.
 - ❖ El radio de la esfera se duplica.
 - ❖ La carga se sustituye por otra ($2Q^+$) dentro, pero no en el centro de la esfera.
2. Responda las anteriores preguntas, sí en lugar de una superficie esférica se piensa en una superficie cilíndrica.
3. ¿Qué relación existe entre el flujo eléctrico y la forma o el tamaño de la superficie contenedora de la carga?
4. Se afirma que el interior de un automóvil es un lugar seguro para protegerse de las tormentas eléctricas ¿Cuál sería la base científica de esto? Explique.
5. ¿En qué condiciones ocurre que el campo eléctrico resulte igual a cero en tanto que el potencial eléctrico sea distinto de cero? Proponga un ejemplo.

6. Acaso podría ocurrir que el potencial eléctrico resulte igual a cero, mientras que el campo eléctrico sería distinto de cero? Proponga un ejemplo.
7. ¿Qué diferencia existe entre el concepto de potencial eléctrico y el concepto de energía potencial eléctrica? Tome en cuenta que ambos expresa en unidades de energía
8. Analice en forma crítica la siguiente afirmación: Las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.
9. Es un hecho que las cargas eléctricas suministradas a una barra de cobre aislada se distribuyen en la superficie y quedan en equilibrio. Use el concepto de campo eléctrico y la ley de Gauss para explicar este fenómeno.
10. El campo eléctrico es nulo en el interior de un cascarón esférico metálico ¿acaso, el potencial eléctrico allí también resulta ser igual a cero? Explique.
11. Los aparatos con circuitos electrónicos usados en los laboratorios pueden ser afectados por campos eléctricos externos. Sugiera algún procedimiento de protección para tales instrumentos.
12. Si dos esferas metálicas cargadas de radios: $r_1 < r_2$, inicialmente aisladas, se conectan por un alambre conductor ¿Qué ocurriría con las densidades de carga? Explique.
13. Si se coloca un vaso plástico, lleno de bolitas de anime, encima de un generador Van de Graff, en funcionamiento, estas pelotitas salen despedidas del vaso y se observa que están cargadas eléctricamente. Pero, si las bolitas se colocan en un vaso de metal, no ocurre lo anterior (las bolitas permanecen en el vaso). Explique este contraste.

Resumen del Capítulo

(Campo Eléctrico)

Conceptualización

- ✓ Región del espacio que rodea a los cuerpos cargados eléctricamente
- ✓ Región del espacio con características y propiedades particulares, las cuales son no necesariamente iguales en diferentes puntos de ella.
- ✓ Región capaz de modificar el estado de movimiento de cargas eléctricas colocados en él.

Como se produce

- ✓ Es el resultado de la interacción que la carga eléctrica en reposo relativo ejerce sobre el espacio que la rodea

Representación

- ✓ Vectorial: \vec{E}
- ✓ Escalar E

Convención para su diagramación

- Líneas de Campo
- Carga eléctrica positiva: líneas saliendo
- Carga eléctrica negativa: líneas entrantes

Descripción

- ✓ \vec{E} tiene un valor específico en cada punto del espacio y éste depende de la configuración del cuerpo cargado, de la cantidad de carga eléctrica neta que contiene, y de la distancia entre el cuerpo cargado y el punto en el cual se desea conocer el valor del campo, a excepción de la lámina cargada, la cual no depende del último parámetro
- ✓ Las líneas de \vec{E} son radiales y abiertas

Notación

- ✓ Vector campo: \vec{E}
- ✓ Potencial: V

- ✓ Flujo: Φ_E
- ✓ Energía: U_{pe}

Unidades

- ✓ $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$

Efectos

- ✓ \vec{E} modifica el estado de movimiento de las cargas eléctricas, esto es, las acelera. En efecto, el campo eléctrico actúa sobre las cargas eléctricas colocadas en él, haciendo que estas últimas modifiquen (cambien) su movimiento lineal, efecto conocido como Fuerza eléctrica

$$F_e = q E$$

- ✓ Las cargas se aceleran en la misma dirección del campo
- ✓ E actúa sobre los electrones libres de los conductores, produciendo un efecto denominado corriente eléctrica "i"

Fórmulas y Relaciones

- ✓ $\Delta\Phi = \vec{E} \cdot \Delta\vec{S}$
- ✓ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$
- ✓ $V_A - V_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)$
- ✓ $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$
- ✓ $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

Utilidad

- ✓ Modificar el estado de movimiento de las cargas eléctricas, esto es, acelerarlas
- ✓ En conductores, genera la corriente eléctrica

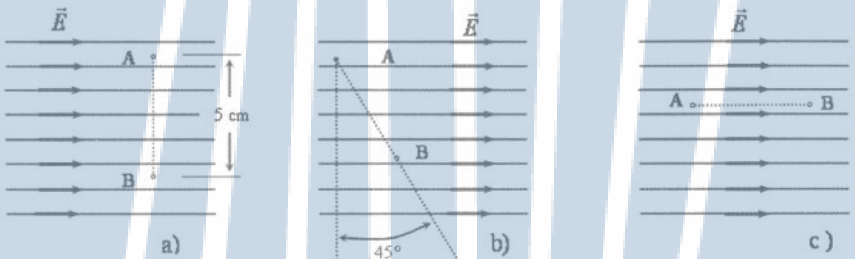
Ejercicios Propuestos

- 1.- La intensidad del campo electrostático de una carga estacionaria es $2 \times 10^{-3} \text{ N/C}$ a 50 cm de ella. Obtenga el valor de este campo a 25 cm y a 1 m de la carga Q

Respuesta: a) $8 \times 10^{-3} \text{ N/C}$; b) $1/2 \times 10^{-3} \text{ N}$

- 2.- Por acción de una fuerza externa, una carga de prueba positiva q , se traslada sin aceleración, entre los puntos A y B dentro de un campo eléctrico uniforme de intensidad 100 N/C . Calcule:

- El trabajo realizado por la fuerza eléctrica en cada caso ilustrado
- La diferencia de potencial entre los puntos indicados

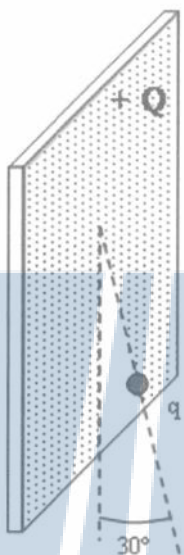


- 3.- Dos cargas puntuales positivas, Q_1 y Q_2 , se ubican como se indica en la figura. Obtenga la relación necesaria entre el valor de estas cargas para que el campo sea nulo en B .

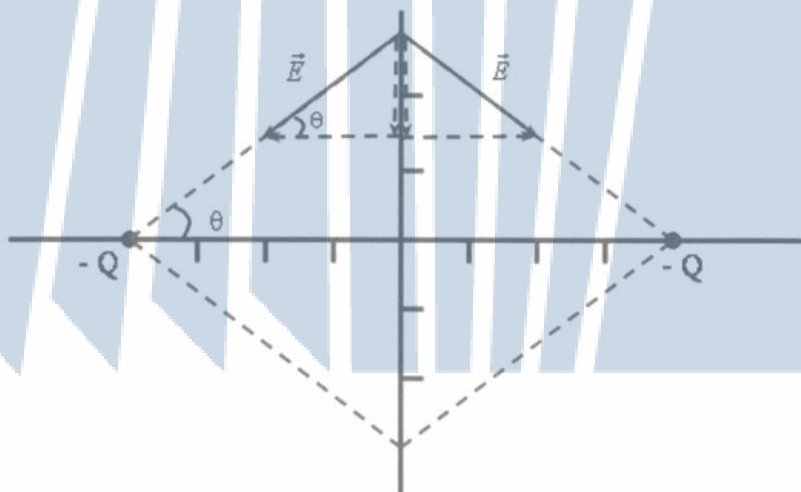
Respuesta: $Q_2 = 9Q_1$



- 4.- Se sabe que una placa de gran extensión aislada y electrizada uniformemente, origina un campo eléctrico uniforme perpendicular a la placa. Supóngase una pequeña esfera electrizada, unida a la placa mediante un hilo aislante, en equilibrio en la posición indicada. Si la masa de la esfera en referencia se estima en 10 g y su carga en $2C$. Calcule la densidad superficial de carga.



- 5.- Dos cargas iguales negativas, se ubican sobre el eje X en $+4\text{cm}$ y -4cm respectivamente. Demuestre que el campo eléctrico en el punto $+3\text{cm}$ sobre el eje y es $\vec{E} = -\frac{480KQ}{m^2}\vec{j}$



Capítulo III

Si bien el campo magnético es una propiedad del espacio inicialmente asociada con los imanes, la experiencia de Oersted no sólo permitió demostrar que alrededor de un conductor por el cual circula corriente eléctrica también se puede encontrar un campo magnético, sino que fue la base de la teoría que inexorablemente vincula los efectos eléctricos y magnéticos.

En esta oportunidad se presenta la noción de **campo magnético**, al igual que en el capítulo anterior, en términos de ideas asociadas con su origen, representación, cuantificación, conceptos asociados y efectos que produce. Especial atención se presta a la acción que ejerce el campo magnético sobre las cargas eléctricas en movimiento y del torque mecánico que produce, efectos que sustenta el diseño de los motores.

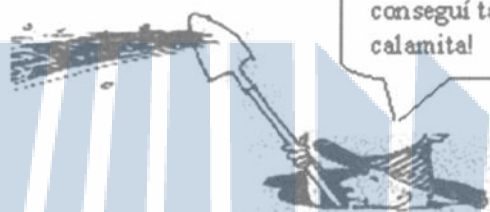
Campo Magnético: Circulación

Ley de Ampere

Campo Magnético Terrestre

Una brújula (o aguja imantada), como se sabe se orienta aproximadamente en la dirección Norte – Sur (N – S) geográficos (situado entre el círculo polar ártico y el círculo polar antártico). Fue a William Gilbert (1544-1603), médico personal de la Reina Isabel de Inglaterra en 1600, quien asoció la orientación de las brújulas con la idea de considerar a la Tierra como un inmenso imán. La dirección de la brújula indicaría, la dirección de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. El extremo de la brújula que apunta al norte geográfico se le denomina “**polo norte**” y el que señala el sur geográfico “**polo sur**”. Por convención se acepta que el sentido del campo será desde el extremo Sur al Norte de la brújula. De esta manera este sencillo instrumento resulta útil para explorar el sentido y la dirección de los campos magnéticos.

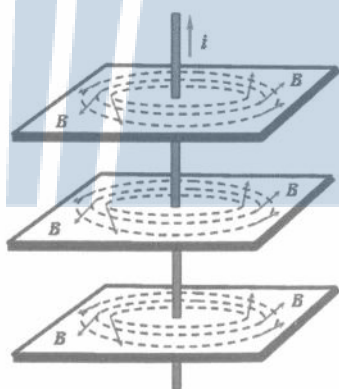
Dicen que los chinos, hace más de 4.500 años,
descubrieron la brújula



Un trozo de calamita es un imán natural

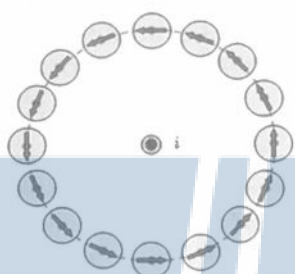
También en la leyenda griega, aparece un pastor de ovejas llamado Magnes que percibió que su bastón de hierro atraía trozos de piedras negras esparcidas por el suelo. Relatos más recientes atribuyen a William Gilbert, médico personal de la reina Isabel I de Inglaterra, estudios sistemáticos en relación con los polos magnéticos, la Tierra como un gran imán, y la obtención de espectros magnéticos con limaduras.

Las primeras ideas de "campo" de Faraday se refieren a su intención de visualizar el espacio circundante de cargas eléctricas estacionarias, imanes y corrientes eléctricas, llenos de líneas de campo como mecanismo de transmisión de las fuerzas eléctricas o magnéticas. Siguiendo esta línea de pensamiento se llama la atención sobre la forma del espectro magnético formado por



Campo Magnético Alrededor de un Alambre conductor

limaduras de hierro esparcidas al azar en las cercanías de una corriente eléctrica. **¡Esto luce extraordinario!**



Se esquemaliza la idea de un grupo de pequeñas brújulas cercanas a una corriente i perpendicular a la hoja

En adición en este libro se acepta la idea primaria de que las limaduras de hierro toman la dirección del campo magnético en cada punto. De esta manera las líneas circunferenciales observadas estarían formadas por una seguidilla de trocitos de hierro transformados en imanes por efecto del campo.

En el esquema de las pequeñas brújulas se conviene que el sentido de la corriente (hacia arriba y perpendicular al papel) es opuesto al sentido de movimiento de los electrones libres del conductor, mientras que al campo magnético se le asigna la misma dirección que las flechas de los dibujos.

Las direcciones relativas de corriente y campo se recuerdan con facilidad mediante la llamada **“Regla de la Mano Derecha”**; que se ilustra a continuación.

Las limaduras se distribuyen aproximadamente formando circunferencias concéntricas con el punto de intersección entre el plano soporte y la corriente; tan importante como esto es que la configuración se repite cualquiera sea ese punto, como se muestra en el esquema adjunto. Es **¡como si la configuración de las limaduras dibujara el campo!**



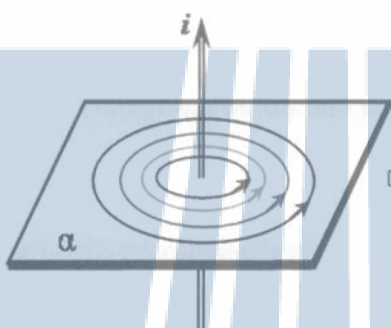
Corriente Estacionaria Producida por una Batería. Interruptor cerrado



Regla de la mano derecha, para indicar sentido del campo magnético y de la corriente eléctrica

Representación de las Corrientes y sus Campos

Una corriente eléctrica de intensidad i , invariable en el tiempo fluyendo por un alambre conductor fijo en el laboratorio se denomina “**Corriente estacionaria**”. La interacción entre estas corrientes y sus campos se visualiza en esquemas adjuntos:

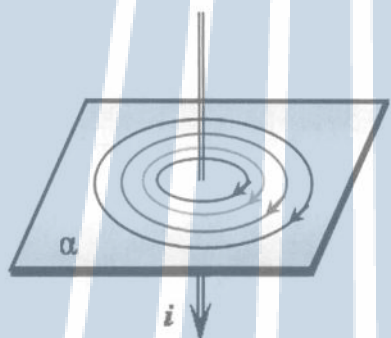


Corriente estacionaria i direccionada hacia arriba y perpendicular al plano α .

Se Representa También

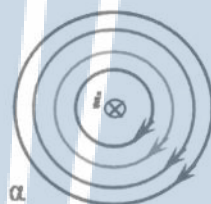


α coincide con el plano de la hoja; i es perpendicular y hacia arriba de la hoja.

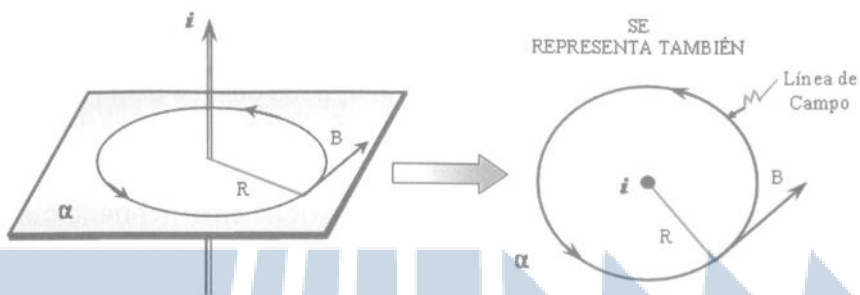


i es perpendicular al plano α y dirigida hacia abajo.

Se Representa También



α coincide con el plano de la hoja i es perpendicular a la hoja, y hacia abajo.



B está sobre el plano α perpendicular a i .

El mismo plano α visto desde arriba. B está sobre α y $B \perp R$.

Campo Magnético Creado por una Corriente Estacionaria

Vector Inducción Magnética \vec{B} ³

Dirección y Sentido de \vec{B}

En la sección anterior nos referimos a la configuración de limaduras de hierro esparcidas al azar en planos perpendiculares a la corriente. Quedó así esbozada la idea que las **Líneas de Campo** se reflejan en las circunferencias concéntricas que muestran las limaduras. En adición se estableció, arbitrariamente, el sentido de esas líneas en términos de la "Regla de la Mano Derecha". Así, quedaron definidos la dirección y sentido de \vec{B} como quedó antes ilustrado.

Circulación de un Campo Magnético. Ley de Ampere

Dar mayor significado a nuevas informaciones exige su relación no arbitraria con saberes preexistentes. En este orden se invita al lector a conectar algunas ideas vinculadas al Campo Electroestático con los nuevos conceptos que surjan del estudio del Campo Magnético.

En esta óptica parece plausible remarcar las características del "Flujo" Φ , como una idea clave en el estudio del Campo Electroestático y mostrar que el concepto de "Circulación" C , hace una función semejante en el ámbito del Campo Magnético.

³ "Inducción magnética es un término inventado por Maxwell."

Circulación de un Campo Magnético

Un primer acercamiento al concepto de circulación del campo magnético de una corriente estacionaria (i) debe guiarse por la forma del espectro correspondiente. De la observación cuidadosa de las líneas de campo se derivan consecuencias teóricas importantes:

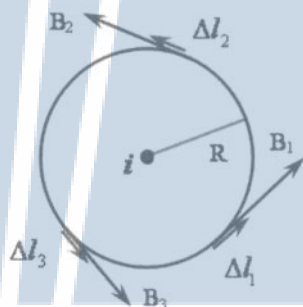
El campo que obliga a los trocitos de hierro a orientarse en el espacio debe existir en todos los puntos de las líneas, ubicarse tangente a las mismas, conservar su valor a lo largo de una determinada circunferencia y disminuirlo con la distancia a la corriente. Similar a como se presentó el concepto de “flujo” del Campo Electroestático, la “circulación” se puede concebir en dos relaciones complementarias que involucren la simetría del espacio y la influencia de la fuente del campo.

La influencia del espacio y de la fuente se concretan en:

Circulación = $\mu_o \cdot i$ donde μ_o o Permeabilidad Magnética es una constante propia del espacio que rodea la corriente vinculada al sistema de unidades. Resaltamos que esta expresión es análoga a la usada para definir el flujo $\left(\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} Q \right)$. Por otra parte, la definición complementaria refleja la simetría o forma geométrica como se establece el campo alrededor de la corriente.

$$\text{CIRCULACIÓN} = \sum_{\text{ Toda la circunferencia }} \vec{B} \cdot \Delta \vec{l}$$

Aquí, \vec{B} es el vector inducción magnética en cada punto de la curva y $\Delta \vec{l}$ el desplazamiento atribuible a un trozo de circunferencia muy pequeño en relación con su longitud total. Se destaca aquí la semejanza de esta definición con la correspondiente al flujo $\Phi = \sum_{\text{ Toda la esfera }} \vec{E} \cdot \Delta \vec{s}$



Para ampliar el concepto de circulación en un campo vectorial examinemos los vectores Inducción Magnética Medias como $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$, etc, ubicados en cada $\Delta \vec{l}_i$ de la circunferencia de radio R , ellos son tangentes a la curva con el sentido determina-

do por la regla de la mano derecha. Consideramos además, los desplazamientos (Δl), muy pequeños en relación con la longitud total de la circunferencia, orientados según la dirección del campo allí y en puntos sucesivos muy próximos (como recorrer la curva a tramos rectos).

Realicemos, además los productos escalares $\vec{B}_i \cdot \vec{\Delta l}_i$ a todo lo largo de la circunferencia y sumemos los resultados, es decir,

$$C = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \cdot \vec{\Delta l}_i . \text{ Observemos también que } \vec{B}_i \parallel \vec{\Delta l}_i \text{ en cada sector, por tanto } \sum_i \vec{B}_i \cdot \vec{\Delta l}_i = \sum_i B_i \Delta l_i \cos 0^\circ = \sum_i B_i \Delta l_i ,$$

al desarrollar la sumatoria

$$\sum_i B_i \Delta l_i = B_1 \Delta l_1 + B_2 \Delta l_2 + B_3 \Delta l_3 + \dots + B_i \Delta l_i , \text{ dado que}$$

$B_1 = B_2 = B_3 = \dots B_i = B$, debido a la simetría del problema (igual distancia a la corriente, igual efecto) queda

$$\sum_i B_i \Delta l_i = B \Delta l_1 + B \Delta l_2 + B \Delta l_3 + \dots + B \Delta l_i . \text{ Aquí el valor}$$

del Campo Magnético (B) es factor común, por lo tanto

$$\sum_i B_i \Delta l_i = B \sum_i \Delta l_i = B (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \dots + \Delta l_i) , \text{ en donde se tiene que}$$

$$\sum_i B_i \Delta l_i = B (\text{Longitud de la circunferencia de radio } R)$$

Es decir, $\sum_i \vec{B}_i \cdot \vec{\Delta l}_i = \sum_i B_i \Delta l_i = 2 \pi R B$. En resumen, la circulación C se expresa finalmente como:

$$C = \sum_{\text{ Toda la circunferencia }} \vec{B} \cdot \vec{\Delta l} = B \cdot 2 \pi R = B (\text{Longitud de la circunferencia de radio } R)$$

Según la primera relación, C es también $C = \mu_0 \cdot i$; al combinar

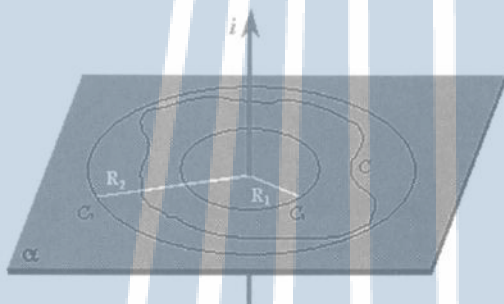
$$\text{estas dos igualdades se concluye que } \sum_{\text{ Toda la circunferencia }} \vec{B} \cdot \vec{\Delta l} = \mu_0 \cdot i$$

Este importante resultado constituye la llamada “**Ley de Ampere**”, en honor al físico que contribuyó en forma destacada al estudio de los **Campos Magnéticos**.

Ampliación y Análisis de la Ley de Ampere

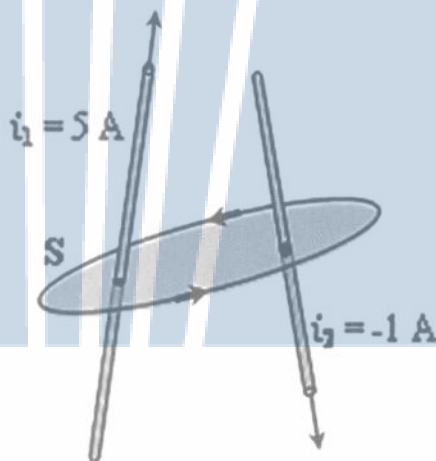
Resaltamos que el producto B (longitud de la curva) resulta independiente del radio de la circunferencia escogida, siempre que ésta circule la corriente i que genera el campo. Aun más puede probarse que el producto en referencia se conserva igual a $\mu_0 i$ para cualquier curva plana o no, cerrada que circule la corriente i .

El término i que aparece en la circulación, $C = \mu_0 i$, conviene entenderlo como una corriente neta, es decir, $i = \sum_{j=1}^n i_j$ para i_j



La circulación es la misma para las tres curvas mostradas

situadas en la parte interior de la curva, no necesariamente en el centro. Además con signo (+) cuando se orienta en la dirección coincidente con la regla de la mano derecha, y (-) cuando el sentido es opuesto, tal como se ilustra en el siguiente ejemplo:



Circulación en $S(C_s)$

$$C_s = \mu_0 i = \mu_0 [5\text{A} + (-1\text{A})] = \mu_0 (4\text{A})$$

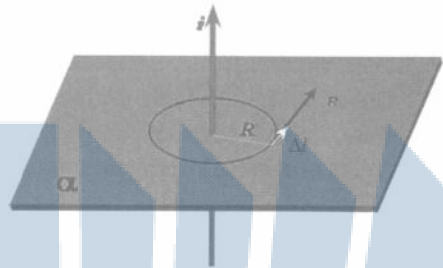
Aplicaciones de la Ley de Ampere

1.- Inducción magnética del campo a una distancia R de una corriente rectilínea estacionaria.

En el plano α según la Ley de Ampere la circulación del campo B a lo largo de las circunferencias de radio R es igual a $C = \mu_0 i$ o también

$$C = \sum_i \vec{B}_i \cdot \Delta \vec{l}_i \text{ como } \vec{B}_i \parallel \Delta \vec{l}_i$$

$$C = \sum_i B_i \cdot \Delta l_i \cos 0^\circ = \sum B_i \Delta l_i$$



$\vec{B} \parallel \Delta \vec{l}$ en todos los puntos de la circulación
 $B_i \cdot \Delta l_i \cos 0^\circ = B \cdot \Delta l$

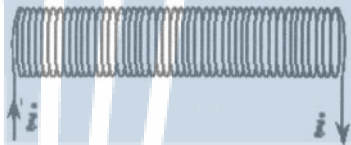
En adición, la simetría del problema hace que todos los B_i a lo largo de la circunferencia en referencia, presenten el mismo valor B . así, al extraer este factor común de la sumatoria queda

$$C = B \sum_i \Delta l_i \text{ donde } C = B 2\pi R \text{ para } \sum_i \Delta l_i = 2\pi R \text{ que es la}$$

longitud de la circunferencia de radio R . Finalmente, agrupando los dos resultados, $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$, con dirección tangente a la circunferencia en referencia y sentido dado por la regla de la mano derecha.

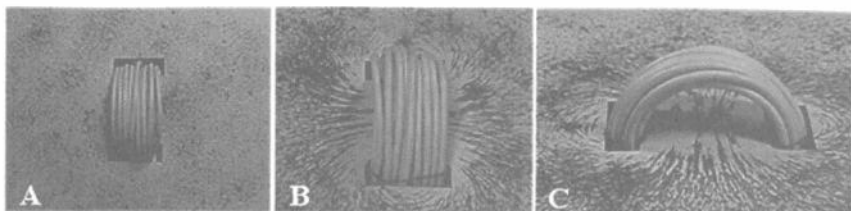
Campo Magnético en la parte Central de un Solenoide Largo con Relación a su Radio

Un solenoide consiste de un hilo conductor enrollado en forma helicoidal, como se ilustra en la figura. Tanto el esquema como la fotografía muestran las líneas de campo en el plano de esta hoja.



El examen de este espectro sustenta las siguientes observaciones:

- El campo es intenso y aproximadamente uniforme en la parte central interna del solenoide (líneas de campos cercanas y paralelas);

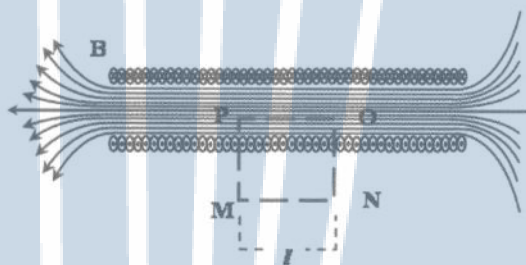


- A) Orientación aleatoria de las limaduras de hierro para una $i=0$
 B) Líneas del campo magnético generadas por una corriente continua que circula por un solenoide (vista transversal);
 C) Vista longitudinal

- b) El campo es débil en la parte central externa de la bobina (no se forman líneas muy definidas);
 c) El campo no es uniforme en los extremos (las líneas se abren como un abanico).

Obtención del Vector Inducción Magnética B , en la Región Central Interna del Solenoide

La dirección de \vec{B} la determinan las líneas de campo y el sentido queda señalado por aplicación de la regla de la mano derecha. Para hallar una relación que permita calcular el valor de \vec{B} , se aplica la “**Ley de Ampere**”.



Circulemos el campo a lo largo del rectángulo MNOPM, esta circulación queda reducida a la obtenida en el segmento OP, es decir a (BI) , dado que en MN es casi nula por la debilidad del campo allí, mientras que en los segmentos más cortos NO y PM la circulación se anula debido a la perpendicularidad de estos con la dirección \vec{B} , como se verifica por simple inspección. Por otra parte, según la **Ley de Ampere**.

$$\text{Circulación total} = \mu_0 I.$$

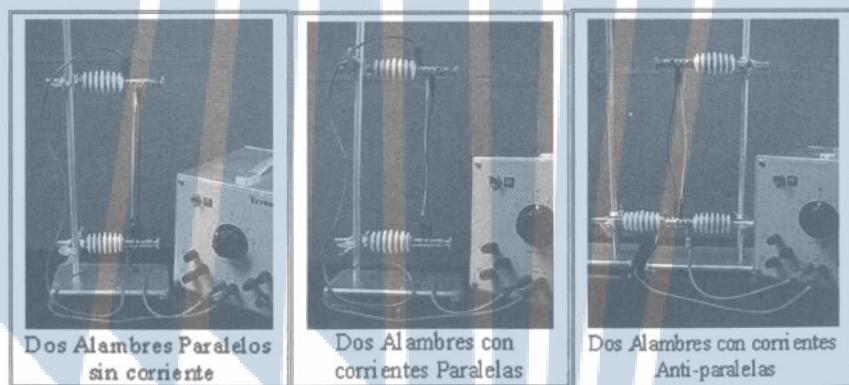
Siendo I la corriente total dentro de la curva circulada. Suponiendo que existen n espiras dentro del rectángulo en

referencia, $I = ni$, para i corriente común en cada espira. Así $Bl = \mu_0 ni \Rightarrow B = \mu_0 i \frac{n}{l} = \mu_0 i N$, donde $N = \frac{n}{l}$ es el número de espiras por unidad de longitud.

En esta relación \vec{B} es independiente de la longitud (l) y del radio (R) de la bobina, mientras R sea bastante menor que l . Por otra parte, es fácil generalizar este resultado para la región central del solenoide, será suficiente con imaginarnos al rectángulo colocado a la derecha o a la izquierda, así como hacia arriba o abajo, siempre que se mantenga alejado de los extremos. Es decir, que la inducción magnética sea la misma para todo el centro de la bobina.

También es posible lograr un campo eléctrico uniforme en un volumen de espacio conveniente, en un condensador de placas planas paralelas cuya separación fuese pequeña en relación con el tamaño de las placas. Ahora mediante una bobina con las características señaladas se consigue también un campo magnético uniforme en un volumen razonable.

Los Experimentos de Ampere



Antes de transcurrir un año del experimento de Oersted, Ampere, (1819) descubrió, en forma experimental, relaciones cualitativas y cuantitativas trascendentes sobre la interacción entre dos corrientes estacionarias paralelas.

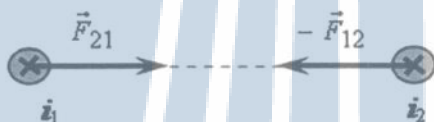
Resultados de Ampere

Dos alambres paralelos portadores de corrientes estacionarias de igual sentido se atraen con una fuerza transversal. Tal es el caso si:

a- las corrientes salen del plano del papel



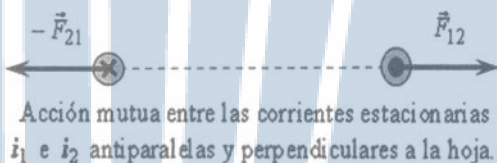
Acción mutua entre las corrientes estacionarias i_1 e i_2 paralelas y perpendiculares y hacia arriba de la hoja



Acción mutua entre las corrientes estacionarias i_1 e i_2 paralelas, perpendiculares y hacia abajo de la hoja

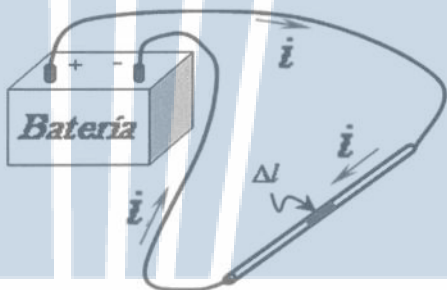
b- si las corrientes entran al plano del papel

c- La fuerza resulta repulsiva si las corrientes son de sentidos opuestos.



Acción mutua entre las corrientes estacionarias i_1 e i_2 antiparalelas y perpendiculares a la hoja.

En el trabajo de Ampere destaca la relación cuantitativa entre las magnitudes que intervienen en la interacción en referencia. Para ello definió un nuevo término: “**Elemento de Corriente**” ($i\Delta l$) de una corriente i en un conductor. Ampere fijó uno de los conductores y midió la fuerza sobre el otro.

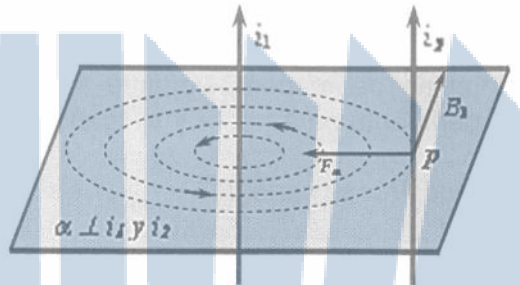


$i\Delta l$ es un elemento de corriente

Él demostró que la fuerza magnética \vec{F}_m que origina una corriente i_1 , de un conductor recto sobre un elemento de corriente $i_2\Delta l_2$, de otro conductor paralelo al primero es proporcional al producto. $i_1(i_2\Delta l_2)$, e inversa a la distancia R que las separa, es decir,

$F_m = \frac{2k_m i_1 (i_2 \Delta l_2)}{R}$ Donde k_m es la constante de proporcionalidad magnética.

No obstante que la perspectiva de Ampere fue de "acción a distancia", sus resultados podrían ser reinterpretados dentro del concepto de campo, asignándole a éste la propiedad de actuar sobre cargas eléctricas en movimiento. Así, en este primer acercamiento, \vec{F}_m sería consecuencia de la acción del campo magnético creado por i_1 , actuando sobre las cargas en movimiento dentro del elemento de corriente $i_2 \Delta l_2$.



F_m y B están sobre el plano α ; i_1 e i_2 son perpendiculares a α .

Con un razonamiento análogo se explicaría la fuerza sobre el elemento de corriente $i_1 \Delta l_1$.

- \vec{B} creado por i_1 ,
- \vec{F}_m actuando sobre $i_2 \Delta l_2$.
- $i_2 \Delta l_2$ en la dirección convenida para i_2 .

De esta expresión se deriva una definición de la unidad de corriente Ampere (A), si dos conductores paralelos rectilíneos separados por un metro de distancia circula la misma corriente y la fuerza por unidad de longitud de cada alambre es de $2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$, entonces la corriente se define como 1A

Fuerza entre Dos Corrientes Estacionarias Paralelas y la Ley de Ampere

Relación entre la constante magnética, K_m y la permeabilidad magnética del espacio μ_0 . En este orden, la fuerza medida por Ampere sobre $i_2 \Delta l_2$ es: $F_m = \frac{2k_m i_1 (i_2 \Delta l_2)}{R}$. Además, según la Ley de Ampere, el valor del campo magnético creado por i_1 , en el "lugar

de elemento de corriente $i_2 \Delta l_2$ es $B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi R}$. Al comparar estas

dos relaciones e igualar las constantes $\left(2K_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \right)$ queda

$$B_1 = \frac{F_m}{i_2 \Delta l_2}$$

Destacamos aquí la importancia de estos resultados: $k_m = \frac{\mu_0}{4\pi}$

combina de manera elegante los constantes K_m surgidos del experimento de Ampere y μ_0 ligado al desarrollo del concepto de

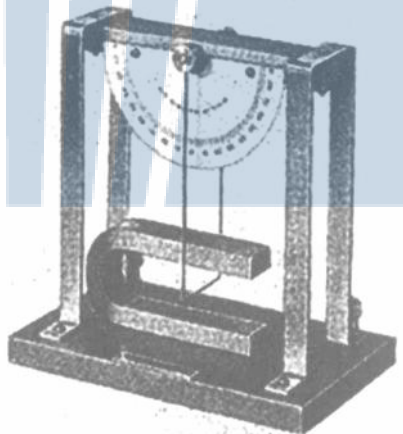
campo. Por su parte $B_1 = \frac{F_m}{i_2 \Delta l_2}$, es semejante de alguna manera a

la definición de $\left(E = \frac{F_e}{q_0} \right)$ para el **Campo Electroestático**. En esta,

E representa el valor de la fuerza eléctrica por cada unidad de carga colocada en un punto del campo, mientras que B se refiere al valor de la Fuerza Magnética que genera el Campo Magnético sobre la unidad de elemento de corriente paralelo a la corriente que genera el campo. No obstante, la semejanza anotada, las fuerzas y campos eléctricos son coplanares en forma distinta a las fuerzas y campos magnéticos que aparecen transversales.

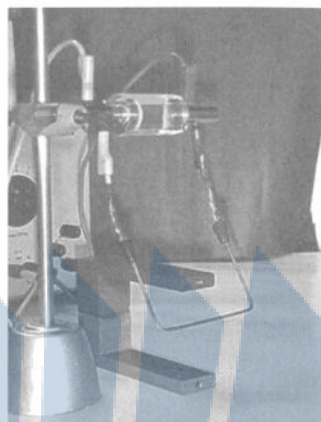
Fuerza sobre una Corriente dentro de un Campo Magnético

Según Ampere los Campos Magnéticos producidos por corrientes eléctricas son de igual naturaleza que los generados por imanes. Aceptar esta idea nos deja en condiciones propicias para encarar el estudio experimental de las fuerzas de interacción entre corrientes y campos magnéticos. En este orden, el **“Columpio Electromagnético”** constituye un recurso didáctico apropiado.



Columpio Electromagnético

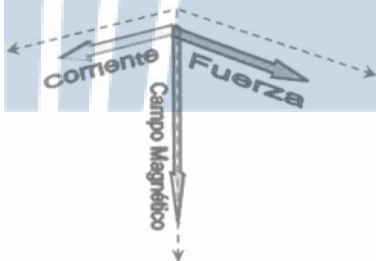
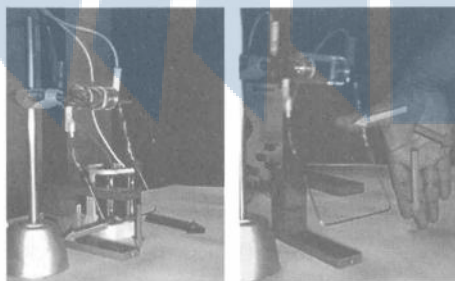
Mediante este montaje se logra colocar una corriente estacionaria dentro del campo magnético de un imán; manipulando el experimento es fácil cambiar el sentido tanto de la corriente como del campo magnético. También es posible variar el ángulo que estos forman. De esta manera, el columpio coadyuva la obtención de informaciones importantes y pertinentes, tales como:



Observaciones cualitativas

- La fuerza magnética es perpendicular al plano determinado por el campo magnético \vec{B} y un elemento de corriente $i\vec{l}$;
- La fuerza magnética es máxima cuando $\vec{B} \perp i\vec{l}$ y es mínima al ser $\vec{B} \parallel i\vec{l}$;
- El sentido de la fuerza magnética depende tanto del sentido de \vec{B} como el de $i\vec{l}$.

Parte de estas observaciones se resumen en la prenombrada “regla de la mano derecha” que no pasa de ser una forma nemotécnica para recordar las posiciones relativas de los vectores: \vec{B} , $i\vec{l}$ y \vec{F}_m . A continuación se ilustra esta situación mediante una fotografía y un esquema.



Regla de la Mano Derecha: posición relativa entre el sentido de la corriente, fuerza magnética y campo magnético

Las observaciones precedentes, aunadas al estudio experimental de Ampere, se sintetizan en la siguiente igualdad vectorial.

$$\vec{F}_m = i\Delta\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_m = (i\Delta l) \cdot (B) \cdot \text{sen } \theta \vec{\mu}$$

Se identifican: θ es el ángulo formado por $i\Delta\vec{l}$ y \vec{B} ; $\vec{\mu}$ vector unitario en la dirección perpendicular al plano determinado por \vec{B} e $i\Delta\vec{l}$.

Obsérvese que en los experimentos de Ampere, en su interpretación en términos de Campo, es $i\Delta\vec{l} \perp \vec{B}$ ($\theta = 90^\circ$, $\text{sen } \theta = 1$), así \vec{F}_m adquiere su máximo valor $F_m = i\Delta l B$. Además, cuando $i\Delta\vec{l} \parallel \vec{B}$ ($\theta = 0^\circ$, $\text{sen } \theta = 0$) $F_m = 0$. Estos resultados son coincidentes con los observados experimentalmente en el Balancín Electromagnético.

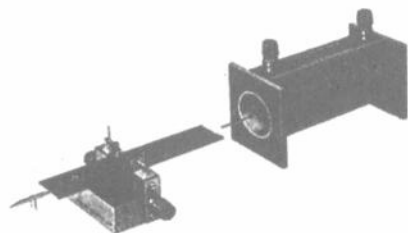
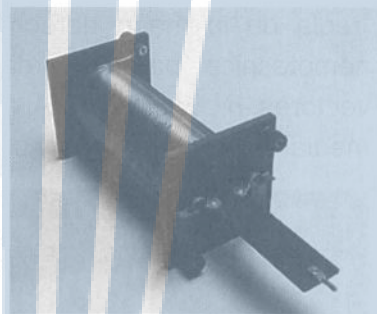
Determinación Experimental de μ_o

Balanza de Corriente (Versión PSSC)

Observación cualitativa

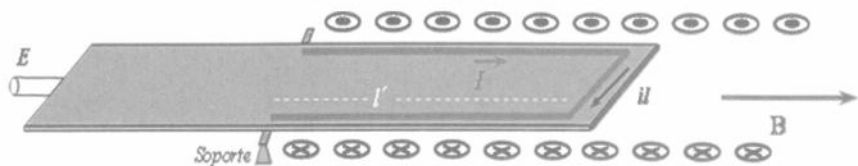
La balanza de corriente es un instrumento formado por:

- Una bobina larga (largo más o menos 8 veces mayor que el radio), con N espira por unidad de longitud con la cual se logra un campo magnético, ($B = \mu_o I N$) aproximadamente uniforme en su región central interna. I es la corriente medida en los terminales de la bobina.



- La balanza propiamente dicha es soportada en un extremo de la bobina de forma que los segmentos de conducción l' queden paralelos a las líneas del campo y la sección

de conducción más corta, l sea perpendicular a estas como se muestra en el siguiente esquema.



Al pasar una corriente i , por el circuito $l'l'$ (se cierra a través de los soportes) se produce una fuerza magnética sobre il (la fuerza sobre los conductores l' es nula porque B es paralelo a il') cuya dirección y sentido es vertical hacia abajo, según queda determinado por la regla de la mano derecha; de esta manera la balanza pierde el equilibrio inicial, el cual se reestablece al colocar pesas en el extremo E . Es claro, entonces que la balanza de corriente en el montaje descrito, permite medir el valor de la fuerza magnética cuando $B \perp il$

En líneas anteriores se estableció que el campo en la bobina es $B = \mu_0 I N$. Por otra parte, la fuerza magnética sobre el elemento de corriente $i'l$ es $F_m = B i'l$.

De estas relaciones queda: $\mu_0 = \frac{F_m}{i i' N \ell}$;

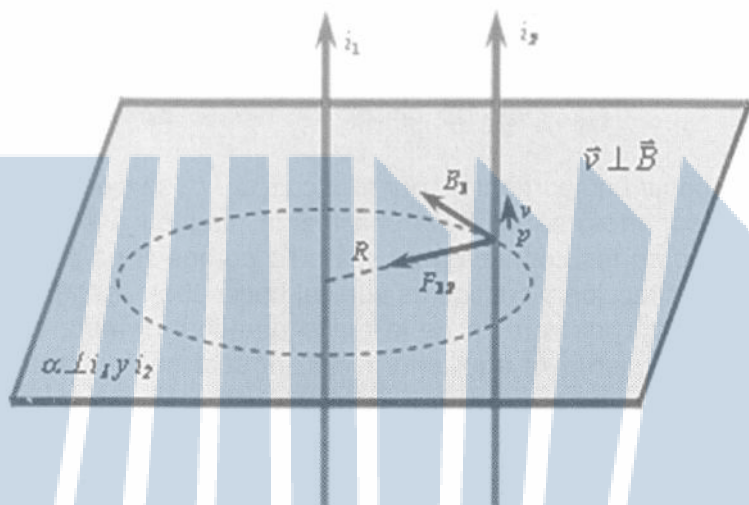
En el experimento antes descrito es posible medir:

- F_m equivalente al peso de la tara usada para restablecer el equilibrio de la balanza de corriente;
- i valor de la corriente en la bobina.
- i' valor de la corriente en el circuito $l'l'$.
- N espiras por unidad de longitud en la bobina;
- l longitud del segmento de conductor en el centro de la bobina y perpendicular al Campo Magnético.

$$\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6} \frac{N}{A^2} \quad \text{o bien,} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

$$\text{con lo cual la constante magnética.} \quad K_m = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}.$$

Movimiento de Cargas Eléctricas en Campos Magnéticos Uniformes



En el siguiente esquema relativo al experimento de Ampere se destacan las siguientes relaciones geométricas:

- El plano α es perpendicular al plano β
- i_1 e i_2 están en el plano β
- \vec{v} está en la intersección de los planos α y β perpendicular al plano formado por \vec{B} y \vec{v}
- \vec{B} se ubica en el plano α .

De allí se infiere y se resaltan las posiciones relativas de los vectores \vec{B}_1 , \vec{F}_{12} y \vec{v} ; donde \vec{F}_{12} es perpendicular a \vec{B}_1 y \vec{v} , es decir que es perpendicular al plano determinado por \vec{v} y \vec{B}_1 .

En términos de campo magnético, el experimento de Ampere muestra que la \vec{F}_{12} de intersección entre el campo \vec{B}_1 creado por i_1 y un "pequeño" sector longitudinal, Δl_2 , del conductor de i_2 es transversal (perpendicular) al plano determinado por los vectores \vec{v} y \vec{B}_1 , donde éstos son: \vec{v} ($v = \frac{\Delta l_2}{\Delta t}$) y \vec{B}_1 .

El resultado cuantitativo de Ampere indica que el valor de esta fuerza es $F_{12} = \frac{2K_m i_1 i_2 \Delta l_2}{R}$, donde K_m es la constante magnética y R es la distancia entre i_1 e i_2 .

La relación anterior interpretada en términos del valor del campo magnético derivado de la Teoría de Campo ($B_1 = \frac{2K_m i_1}{R}$) se transforma en $F_{12} = B_1 i_2 \Delta l_2$.

Ahora bien, si reducimos el problema a la fuerza magnética actuando sólo sobre un longitud de conductor Δl_2 , muy cercano a cero, es decir pequeñísimo, se podría asumir que la carga Δq , allí contenida se aproxima a ser puntual. En este orden, $i_2 = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ donde Δt sería el tiempo que emplearía Δq (puntual) para recorrer a Δl_2 con rapidez $\vec{v} = \frac{\Delta l_2}{\Delta t}$. Usando estas igualdades F_{12} se transforma, en $F_{12} = \Delta q \cdot v \cdot B$.

Si además se toma en cuenta las direcciones relativas de \vec{B}_1 , \vec{v} y F_{12} , y las propiedades del producto vectorial, F_{12} se puede expresar de la forma siguiente $\vec{F}_{12} = \Delta q \vec{v} \times \vec{B}$

Trabajo realizado por la fuerza magnética sobre una carga puntual (q) con velocidad (\vec{v}) dentro de un campo magnético uniforme (\vec{B})

La evidencia experimental, donde destaca la Experiencia de Rowland, sustenta la posibilidad de extender la relación de F_{12} más allá de las condiciones del experimento de Ampere y llevar su aplicación al movimiento de cargas puntuales (e iones, etc) en cualquier campo magnético uniforme.

Así el trabajo de \vec{F}_m sobre una carga puntual moviéndose en un campo magnético uniforme resulta nulo, en efecto: $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$, donde $\vec{F}_m \perp \vec{v}$.



Además, tomando en cuenta que las cargas puntuales no carecen de masa y las características y condiciones del Movimiento Circular uniforme, las cargas que inciden en \vec{B} uniforme, con velocidad \vec{v} describirán órbitas circunferenciales con lo cual \vec{F}_m , resulta una

fuerza centrípeta. Por otra parte, $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t}$, donde $\Delta\vec{S}$ es un sector ínfimo de arco de circunferencia paralelo a \vec{v} . En resumen: $\vec{F}_m \perp \vec{v}$; $\vec{v} \parallel \Delta\vec{S}$, en consecuencia $\vec{F}_m \perp \Delta\vec{S}$. El trabajo de \vec{F}_m para el desplazamiento $\Delta\vec{S}$ es $\Delta T = \vec{F}_m \cdot \Delta\vec{S}$; donde $\Delta T = F_m \Delta S \cos 90^\circ = 0$. Finalmente el trabajo para toda la órbita se obtiene sumando todos estos ΔT , así $T = 0$

Valor y Unidades de la Constante Magnética K_m y de la Permeabilidad Magnética μ_0

Definición del Ampere

Del estudio experimental de Ampere sobre la fuerza de interacción entre dos alambres largos y paralelos, conductores de sendas corrientes i_1 e i_2 , separadas a una distancia R , se derivó la siguiente relación relativa a la fuerza magnética \vec{F}_m , que efectuaba sobre un trozo l de conductor (por ejemplo l_2 del alambre que conduce a i_2)

$$F_m = \frac{2K_m i_1 i_2 l_2}{R}$$

A partir de aquí se define el Ampere como unidad (SI) de intensidad de corriente. Para ello convienen las siguientes condiciones:

$$i_1 = i_2 = i = 1A$$

$$l_2 = R = 1m$$

$$F_m = 2 \times 10^{-7} N$$

De aquí se obtiene la siguiente definición: La intensidad de corriente que fluye por cada uno de los conductores paralelos muy largos, es de 1 Ampere ($1A$), cuando éstos están separados 1metro ($1m$) y la fuerza magnética que actúa sobre un trozo de 1metro ($1m$) de longitud en uno de ellos es de $2 \times 10^{-7} N$.

A partir de estas condiciones se determina el valor y las unidades, tanto de k_m como de μ_0 . Para ello es suficiente con sustituir, en la fórmula de F_m , los valores indicados en la definición.

Finalmente se concluye $k_m = 10^{-7} N / A^2$, además $k_m = \frac{\mu_0}{4\pi}$,

entonces $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N / A^2$

Resumen del Capítulo

(Campo Magnético)

Conceptualización

- ✓ *Región del espacio que rodea a los imanes*
- ✓ *Región del espacio que rodea a los conductores por donde circula corriente eléctrica*
- ✓ *Región del espacio con características y propiedades particulares, las cuales son no necesariamente iguales en diferentes puntos de ella.*
- ✓ *Región del espacio capaz de modificar el estado de movimiento de cargas eléctricas en movimiento*

Como se produce

- ✓ *Es creado como consecuencia tanto de corrientes eléctricas estacionarias como de cargas eléctricas en movimiento*

Representación

- ✓ *Vectorial: \vec{B}*
- ✓ *Líneas de campo*

Convención para su diagramación

- *Norte magnético: líneas de campo saliendo*
- *Sur magnético: líneas de campo entrantes*

$$\checkmark \quad k_m = \frac{\mu_o}{4\pi} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

Utilidad

- ✓ Al modificar el estado de movimiento de las cargas eléctricas, esto es, acelerarlas, produce un torque mecánico, lo cual permite crear los generadores de corriente eléctrica y los motores eléctricos.
- ✓ En conductores, genera la corriente eléctrica.

Problemas Resueltos

- 1.- Un electrón es acelerado, desde el reposo, por medio de una diferencia de potencial (V) de 2000 voltios. El electrón entra en una región donde hay un campo magnético uniforme en ángulo recto. El campo magnético (B) = $1,00 \times 10^{-3}$ Newton/Amper-metro ($N/A.m$)
- a) ¿Cuál es el radio (r) de la circunferencia en que se mueve?
 - b) ¿Cuál es el período (T) del movimiento circular del electrón?
 - c) Si la diferencia de potencial fuera de 8000 V . Determine la magnitud del período (T) y del radio (r)

Solución:

- a) Para encontrar el período necesitamos conocer la velocidad del electrón y la circunferencia en el cual viaja. La velocidad puede ser encontrada de la energía cinética $\left(E_c = \frac{1}{2}mv^2 \right)$ y la energía del electrón acelerado por la diferencia de potencial V .

$$V = 2000V$$

$$q_e = 1,6 \times 10^{-19} C$$

$$m_e = 0,911 \times 10^{-30} Kg$$

$$E = qV$$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\text{Luego } \frac{1}{2}mv^2 = qV \rightarrow v^2 = \frac{2qV}{m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000V \cdot 1,6 \times 10^{-19} C}{0,911 \times 10^{-30} Kg}} = \sqrt{7,03 \times 10^{19} m^2 / s^2} = 2,6 \times 10^7 m/s$$

Obtención de la ecuación:

$$F = qvB; \text{ como } F \text{ es centrípeta } F = m \frac{v^2}{R}$$

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$mv = qrB // r = \frac{mv}{qB}$$

$$r = \frac{0,911 \times 10^{-30} Kg \cdot 2,6 \times 10^7 m/s}{1,6 \times 10^{-19} C \cdot 1,0 \times 10^{-3} N/A \cdot m} = 0,15 m$$

- b) Cuando el electrón entra en el campo magnético (B), la fuerza magnética actúa en ángulo recto para la dirección del campo y la velocidad (la fuerza es perpendicular a la dirección del campo y a la velocidad). El electrón se mueve en un círculo de radio $r = mv/qB$, a velocidad constante.

La circunferencia es entonces $c = 2\pi r = 2\pi mv/qB$; el período del movimiento circular es el tiempo necesario para que el electrón dé una vuelta completa. Así, $w = \frac{2\pi}{T}$; Donde: $v = wr$

T es el Período

$$T = \frac{2\pi}{w} = \frac{2\pi r}{v}$$

$$r = 0,15 m \text{ y } v = 2,66 \times 10^7 m/s$$

$$T = \frac{2\pi \cdot 0,15 m}{2,6 \times 10^7 m/s} = \frac{0,95 m}{2,6 \times 10^7 m/s} = 3,6 \times 10^{-8} s$$

- c) Para $V_2 = 8000 V$

Como $V_2 = 8000 V$ y $V_1 = 2000 V$, entonces $V_2 = 4V_1$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2qV_2}{m}}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2q \cdot 4V_1}{m}}, \text{ como } v_1 = \sqrt{\frac{2qV_1}{m}}$$

Es decir: $v_2 = 2\sqrt{\frac{2qV_1}{m}}$; $v_2 = 2v_1$

Para el radio y $V = 8000V$

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad \text{y} \quad vm = qrB$$

$$m^2v^2 = q^2r^2B^2$$

$$v^2 = \frac{q^2r^2B^2}{m^2}$$

$$\frac{1}{2}m \left(\frac{q^2r^2B^2}{m^2} \right) = qV$$

$$\frac{1}{2}r^2B^2 = 2mV$$

$$r^2 = \frac{2mV}{B^2q}$$

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

$$r_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV_2}{q}}$$

$$r_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m4V_1}{q}} = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mV_1}{q}} = 2r_1$$

$$r_2 = 2r_1 = 0,30m$$

$$T_2 = \frac{2\pi r_2}{v_2}$$

$$T_2 = \frac{2\pi 0,30m}{2v_1} = 0,35 \times 10^{-7} s$$

Problemas Propuestos:

- 1.- A partir del experimento de Oersted se acepta que los campos magnéticos se originan en el movimiento de cargas eléctricas ¿Será posible obtener campos magnéticos de otra manera?
- 2.- El resultado de los experimentos de Ampere demuestra que la fuerza entre dos alambres, es proporcional al producto de las intensidades correspondientes e inversa a la distancia de separación. Explique esta relación mediante ejemplos.
- 3.- Una partícula de carga q , y masa m , se mueve con una velocidad \vec{v} perpendicular a un campo magnético uniforme \vec{B} , describe una trayectoria circular de radio R . Demuestre que la energía cinética de esta partícula es $E_c = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$

- 4.- Un electrón se mueve dentro de un campo magnético uniforme con una velocidad de 10^6 m/s , perpendicular al campo. Determine la intensidad del campo magnético para que la órbita del electrón de 50 cm de radio.
- 5.- Un ión con carga equivalente a $4e$ incide en un campo magnético de $1,5 \text{ Wb/m}^2$ (o N/A.m). Si el ángulo de incidencia es de 60° entre la velocidad del ión y el campo magnético. Halle el valor de la fuerza magnética.
- 6.- En la situación física de dos corrientes paralelas de igual sentido, de intensidades de 1 A y 10 A respectivamente, separadas a 15 cm . Hallar el valor del campo magnético en un punto situado entre las corrientes a 10 cm de la primera mencionada
- 7.- Dos corrientes paralelas de igual sentido de 10 A y 5 A respectivamente, se encuentran separadas a 12 cm de distancia. Determinar en que punto, en la línea que une las corrientes, se anula el campo magnético resultante

Resp: $3.8 \times 10^{-9} \text{ N/A.m}$

Resp: a 8 cm de la corriente de 10 A

Apéndice

Algunas Constantes Fundamentales

$$1C \text{ (Coulomb)} = 6,242 \times 10^{18} e$$

$$1 A \text{ (Ampere)} = 1 C/s = 6,242 \times 10^{18} e/s$$

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

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$$

$$B \text{ (Wb/m}^2\text{)} = \text{N/A.m} = 1\text{Tesla} = 10^4 \text{ gauss}$$

$$1eV = 1,62 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ Joule} = 6,292 \times 10^{18} eV$$

$$e = 1,602 \times 10^{19} C$$

$$k = 8,988 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

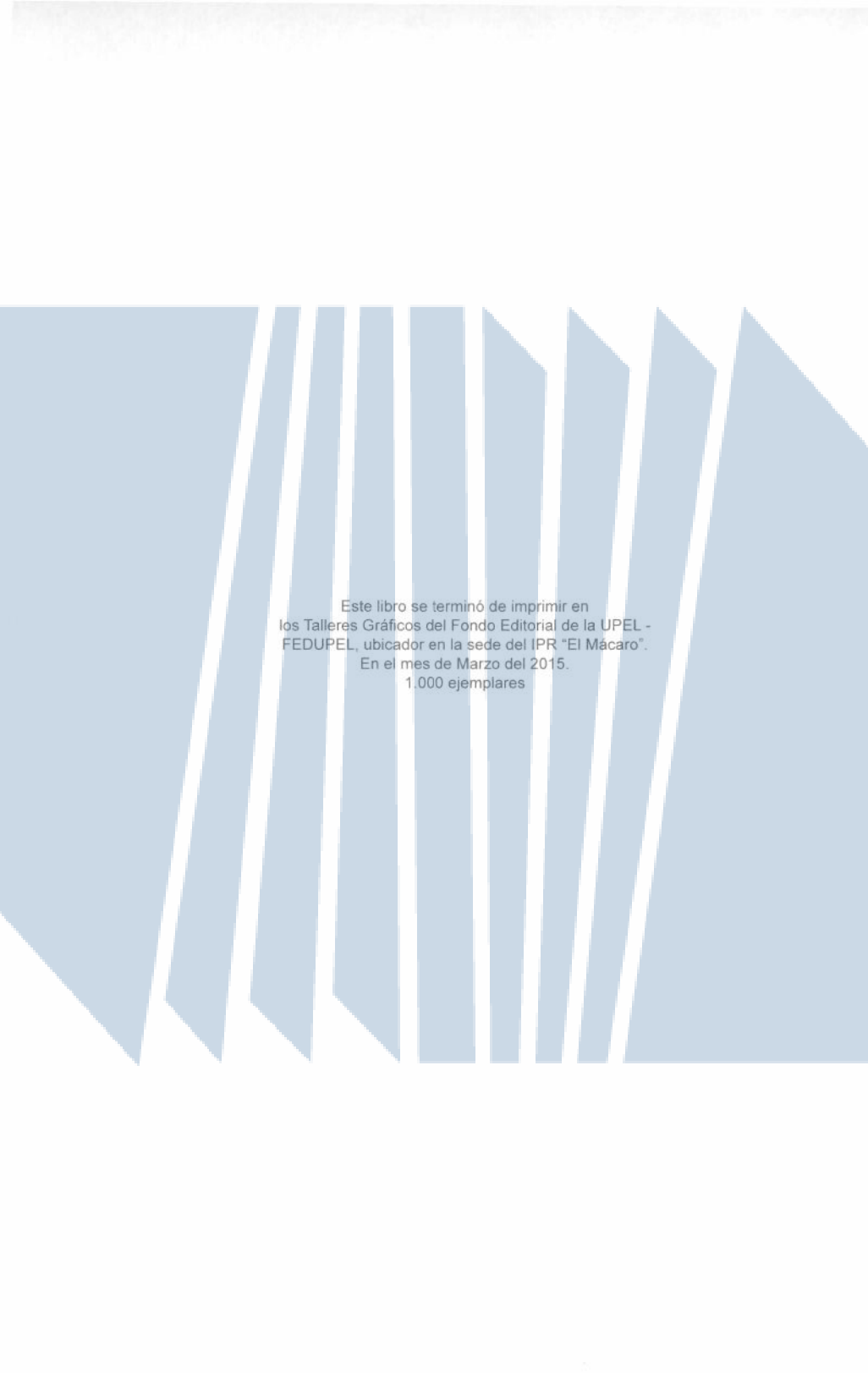
$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ Kg} = 0,5110 \text{ MeV}/\text{C}^2$$

$$m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ Kg} = 938,3 \text{ MeV}/\text{C}^2$$

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ Kg} = 939,6 \text{ MeV}/\text{C}^2$$

Referencias

- Arons, A. (1970). *Evolución de los conceptos de la física*. México: Trillas.
- Feynman, R., Leighton, R. y Sands, M. (1987). *Electricidad y magnetismo*. Vol. 2. Estados Unidos: Addison Wesley Iberoamericana.
- Einstein, A. e Infeld, L. (1974). *La Física una aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Losada.
- Goldemberg, J. (1972). *Física general y experimental*. Vol. 2. México: Nueva Editorial Interamericana.
- Grigóriev, V. y Miákišev, G. (1986). *Las fuerzas de la naturaleza*. Moscú: Editorial Mir.
- Grupo de Reelaboración Do Ensino de Física GREF (2000). *Física 3: Electromagnetismo*. Brasil: Edusp Editorial.
- McKelvey, J. y Grotch, H. (1981). *Física para Ciencias e Ingeniería*. Tomo II. México: Harla.
- Schwartz, J. y McGuinness, M. (S/F). *Einstein para principiantes*. Buenos Aires: Era Naciente Ediciones.
- Yavorski, B. y Pinski, A. (1983). *Fundamentos de Física*. Tomo I. Moscú: Editorial Mir.

The background of the page is a light blue color. It features a series of vertical, slightly slanted white lines that create a sense of depth and movement. These lines are of varying heights and are set against a backdrop of larger, overlapping blue shapes that resemble stylized, angular waves or architectural elements. The overall effect is modern and graphic.

Este libro se terminó de imprimir en
los Talleres Gráficos del Fondo Editorial de la UPEL -
FEDUPEL, ubicado en la sede del IPR "El Mácaro".
En el mes de Marzo del 2015.
1.000 ejemplares

Física

Introducción a la

Electricidad y Magnetismo

El hombre, desde que se maravilló por las manifestaciones de la naturaleza y los misterios que ellas encierran, se lanzó en aventuras tanto del pensamiento como del quehacer empírico, con la intencionalidad primaria de dar razones necesarias más no suficientes para esclarecer sus secretos, apoyándose en la idea fundamental de que ésta es, en principio, cognoscible.

La Física, como toda ciencia, está hermosamente bien construida donde todas sus partes encajan como una melodía agradable, no sólo en su extensión sino también en cada una de sus tonadas. En vista de ello, este texto surge de la inquietud de un grupo de docentes, con la intencionalidad didáctica de exponer algunos elementos fundamentales asociados con los principios, leyes y teorías que pretenden explicar las manifestaciones electromagnéticas, a fin de que el lector pueda de una manera más expedita construir los conceptos con una mayor red de significados. De esta manera ofrece la posibilidad que, desde la didáctica, se puedan hacer referencias a puentes y conexiones entre los diferentes componentes teóricos que la conforman.

Los Autores



Universidad
Pedagógica
Experimental
Libertador



978-980-281-218-9

Física

Introducción a la

Electricidad y Magnetismo

El hombre, desde que se maravilló por las manifestaciones de la naturaleza y los misterios que ellas encierran, se lanzó en aventuras tanto del pensamiento como del quehacer empírico, con la intencionalidad primaria de dar razones necesarias más no suficientes para esclarecer sus secretos, apoyándose en la idea fundamental de que ésta es, en principio, cognoscible.

La Física, como toda ciencia, está hermosamente bien construida donde todas sus partes encajan como una melodía agradable, no sólo en su extensión sino también en cada una de sus tonadas. En vista de ello, este texto surge de la inquietud de un grupo de docentes, con la intencionalidad didáctica de exponer algunos elementos fundamentales asociados con los principios, leyes y teorías que pretenden explicar las manifestaciones electromagnéticas, a fin de que el lector pueda de una manera más expedita construir los conceptos con una mayor red de significados. De esta manera ofrece la posibilidad que, desde la didáctica, se puedan hacer referencias a puentes y conexiones entre los diferentes componentes teóricos que la conforman.

Los Autores



Universidad
Pedagógica
Experimental
Libertador



978-980-281-218-9