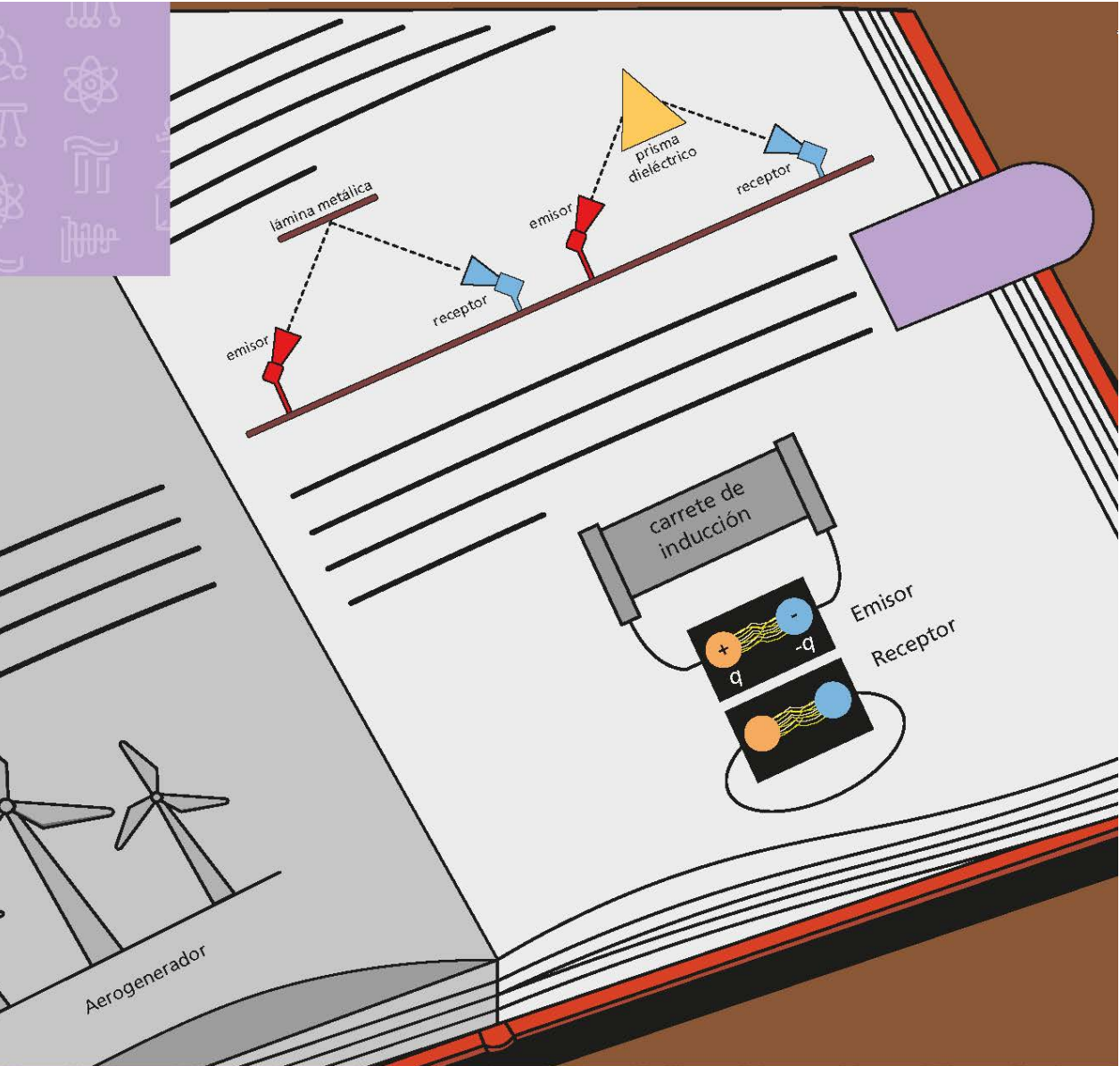




FÍSICA

onceno grado

FÍSICA

onceno grado

Lic. Carlos Enrique Sifredo Barrios

Lic. Alberto A. Santana Mora

Lic. José M. Mora Hernández

Lic. Carlos M. Barroso González

Ms. C. Maikel Ortiz Carmona

Ms. C. Alexis Gómez Zoque

Lic. Rafael Rodríguez Pino



**EDITORIAL
PUEBLO Y EDUCACIÓN**

Este material forma parte del conjunto de trabajos dirigidos al Tercer Perfeccionamiento Continuo del Sistema Nacional de la Educación General. En su elaboración participaron maestros, metodólogos y especialistas a partir de concepciones teóricas y metodológicas precedentes, adecuadas y enriquecidas en correspondencia con el fin y los objetivos propios de cada nivel educativo, de las exigencias de la sociedad cubana actual y sus perspectivas.

Ha sido revisado por la subcomisión responsable de la asignatura perteneciente a la Comisión Nacional Permanente para la revisión de planes, programas y textos de estudio del Instituto Central de Ciencias Pedagógicas del Ministerio de Educación.

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización previa y por escrito de los titulares del **copyright** y bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, así como su incorporación a un sistema informático.

Material de distribución gratuita. Prohibida su venta

Edición y corrección:

- Lic. Amada Díaz Zuazo

Diseño, cubierta, ilustración:

- Instituto Superior de Diseño

Emplane:

- Elier Guzmán Lajud

Instituto Superior de Diseño:

Anelís Simón Sosa ■ María Paula Lista Jorge ■ Sara Sofía Delgado Méndez ■ Isell Rodríguez Guerra ■ Daniela Domínguez Ramírez ■ Amanda Serrano Hernández ■ Rocío de la C. Ruiz Rodríguez ■ Evelio de la Sota Ravelo ■ Ana Laura Seco Abreu ■ Arianna Ruenes Torres ■ Reynier Polanco Somohano ■ Celia Carolina Céspedes Pupo ■ Elizabeth Diana Fajardo Céspedes ■ Laura Rosa Almero Fong ■ Elizabeth Blanco Galbán ■ Laura Reynaldo Jiménez ■ Daniela Arteaga Martínez ■ Daniela Alpízar Céspedes ■ Roberto Pérez Curbelo ■ Ariel Abreu Ulloa ■ M. Sc. Maité Fundora Iglesias ■ Dr. C. Ernesto Fernández Sánchez ■ D.I. Eric Cuesta Machado ■ D.I. Julio Montesino Carmona

© Ministerio de Educación, Cuba, 2024

© Editorial Pueblo y Educación, 2024

ISBN 978-959-13-4844-9 (Versión impresa)

ISBN 978-959-13-4845-6 (Versión digital)

EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN

Ave. 3.^a A No. 4601 entre 46 y 60,
Playa, La Habana, Cuba. CP 11300.
epueblo@epe.gemined.cu



ÍNDICE

1

Movimiento de los fluidos..... 1

1.1	Conceptos básicos	4
1.2	Ecuación de continuidad.....	10
1.3	Ecuación de Bernoulli	12
1.4	Algunas aplicaciones de la dinámica de los fluidos	21
1.5	Ley de Stokes. Coeficiente de viscosidad	31
	Tareas generales del capítulo	39

2

Fundamentos de la teoría cinético-molecular de los gases y de la termodinámica 43

2.1	Modelo del gas ideal	44
2.2	Movimiento browniano	46
2.3	Cálculo de la presión ejercida por un gas sobre la base de la Teoría Cinético-Molecular	51
2.4	Interpretación de la temperatura según la Teoría Cinético-Molecular. Escala termodinámica de temperatura	55
2.5	Ecuación de estado del gas ideal	63
2.6	Leyes de los gases.....	65
2.7	Introducción a la termodinámica	76
2.8	Equilibrio térmico	78
2.9	Calor	80
2.10	El trabajo en la termodinámica	83
2.11	Equivalente mecánico del calor	85
2.12	Energía interna del gas ideal	87
2.13	Primer Principio de la Termodinámica	89
2.14	Segunda ley de la termodinámica. Máquinas térmicas	93
	Tareas generales de la capítulo	106

3

Electrostática 115

3.1 Carga eléctrica	116
3.2 Ley de Coulomb	124
3.3 Campo electrostático. Vector intensidad del campo electrostático. Representación gráfica del campo electrostático	135
3.4 Cálculo de la intensidad de campo eléctrico en un sistema de cuerpos cargados puntuales	143
3.5 Trabajo en el campo electrostático. Energía potencial de un cuerpo cargado en un campo electrostático. Potencial electrostático y su relación con la intensidad de campo. Cálculo del potencial en sistemas de cuerpos cargados puntuales	148
3.6 Campo electrostático entre dos placas planas paralelas cargadas muy próximas entre sí	155
3.7 Campo electrostático de una esfera metálica cargada. Poder de las puntas. Conductores en un campo electrostático externo	158
3.8 Capacidad y capacitores. Dieléctricos en un campo electrostático ..	164
3.9 Energía almacenada en el campo electrostático. Acoplamiento de capacitores	171
Tareas generales del capítulo	177

4

Electricidad y magnetismo 185

4.1 Corriente eléctrica. Intensidad de la corriente eléctrica. Tensión de una fuente o fuerza electromotriz	186
4.2 Ley de Ohm para un circuito completo. Acoplamientos de las fuentes. Reglas de Kirchhoff para circuitos eléctricos	194
4.3 Corriente eléctrica en diferentes medios	207
4.4 Campo magnético	225
4.5 La interacción de conductores con corriente y el campo magnético ..	230
4.6 Características del campo magnético de algunas configuraciones por la que circula corriente eléctrica	240
4.7 Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos	249
4.8 Fuerza de Ampere.....	256
4.9 Propiedades magnéticas de la sustancia. Hipótesis de Ampere	261
Tareas Generales del Capítulo	268

5

Inducción electromagnética 276

5.1 Fenómeno de la inducción electromagnética. Flujo del vector inducción magnética	277
5.2 Ley de Faraday de la inducción electromagnética. Tensión de inducción o fuerza electromotriz de inducción	283
5.3 Algunas aplicaciones de la inducción electromagnética	307
5.4 Autoinducción e inductancia	320
5.5 Energía del campo magnético de una corriente	325
Tareas generales del capítulo	327

6

Oscilaciones electromagnéticas 337

6.1 Oscilaciones electromagnéticas libres. Circuito L-C	338
6.2 Oscilaciones electromagnéticas forzadas. Corriente alterna	349
6.3 Resonancia de corriente	363
6.4 Rectificación de la corriente alterna	367
6.5 La electrificación en Cuba	370
Tareas generales del capítulo	371

7

Ondas electromagnéticas 375

7.1 Relación entre los campos eléctricos y magnéticos variables. Ondas electromagnéticas	376
7.2 Obtención de ondas electromagnéticas. Experimento de Hertz ...	384
7.3 Propiedades de las ondas electromagnéticas	386
7.4 Ondas estacionarias. Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Efecto Doppler	391
7.5 Principio de la telecomunicación	393
Tareas generales del capítulo	396

Soluciones a los ejercicios 400

Bibliografía 410



CAPÍTULO 1

Movimiento de los fluidos

Seguro recuerdas las propiedades de los fluidos, así como las leyes de Pascal y Arquímedes, estudiadas en los cursos precedentes, que permiten explicar algunas características de los fluidos en reposo y sus aplicaciones prácticas.

En este capítulo continuaremos ampliando nuestros conocimientos sobre el comportamiento de los fluidos, cuando se encuentran en movimiento o, lo que puede ser equivalente, cuando un cuerpo se mueve en un fluido (figura 1.1).



Fig. 1.1 ¿Cómo es posible que un avión se mantenga en vuelo?

Antes de comenzar este estudio, puede ser útil reflexionar sobre (o mejor hacer), dos sencillos experimentos:

Experimento 1

Toma la tapa plástica de un pomo de diámetro aproximado de dos centímetros, consigue un tubo relativamente fino, que puede ser de plástico, cuyo diámetro interior esté comprendido entre 2 mm y 3 mm y su longitud se encuentre entre 10 cm y 20 cm (puede ser un “absorbente”), hace falta una pequeña porción de cartulina plana que no esté arrugada, una astillita de madera o un fósforo, algunas herramientas y estudiantes dispuestos a experimentar.

El experimento se hace como sigue: del trozo de cartulina se recorta un disco de igual diámetro que la tapa y en su centro se inserta, perpendicularmente a este, la astilla de madera, el fósforo, o un alfiler con las dimensiones y forma parecidas. El objeto que se inserte debe tener toda su longitud sobresaliendo de uno de los lados del círculo en el extremo insertado, introduciendo solo lo necesario para que no se salga de esa posición.

En el centro de la tapa se practica un orificio cuyo diámetro sea suficiente para que el tubo entre ajustado a este, para que quede como “pegado” a la tapa (de hecho, si se pega con algún pegamento será mucho mejor, pero no es estrictamente necesario). El tubo y la tapa deben ensamblarse, mediante la introducción de uno de los extremos del tubo en el orificio de la tapa de tal forma que no sobresalga.

El disco de cartulina se coloca sobre una mano abierta o sobre una mesa o sobre cualquier otra superficie horizontal, de forma tal que la astilla, el fósforo, quede en posición vertical. Se toma el tubo con la tapa ajustada, se suspende verticalmente con la tapa hacia abajo y se coloca encima del disco de cartulina de tal forma que el objeto insertado en este (astilla, fósforo, etc.) penetre por el extremo del tubo que está hacia abajo. Es importante que la tapa y el disco se toquen suavemente y sus bordes coincidan.

Con el sistema en la situación descrita “soplar” sostenidamente por el extremo superior del tubo y mientras se sopla levantar el tubo con la tapa y observar lo que ocurre, mientras se tiene el tubo levantado dejar de soplar y observar lo que ocurre. Para ganar en claridad en las observaciones pueden hacerse varios ensayos del experimento.

Se propone responder, al menos estas dos preguntas.

1. ¿Ocurrió lo que, antes de hacer el experimento, se suponía que ocurriría?

2. ¿A qué se debe que haya ocurrido el fenómeno observado? ¿Cuántos factores intervinieron?

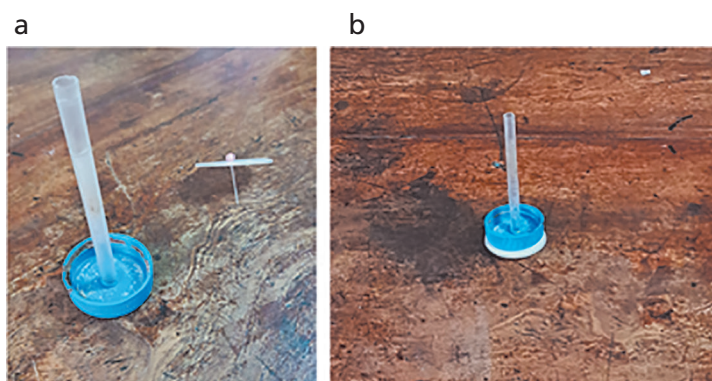


Fig. 1.2 a) montaje final según sus componentes
b) dispositivo listo para el experimento

¿Qué ha ocurrido? ¿Coincide con lo que esperabas? ¿Puedes explicar el comportamiento de lo ocurrido?

Experimento 2

Toma una cinta de papel de aproximadamente un centímetro de ancho y 15 o 20 cm de largo, fíjala en el borde de una mesa con cinta adhesiva, como se muestra en la figura 1.3 la mayor parte de la cinta debe quedar colgando. Soplar sostenidamente logrando que una corriente de aire pase por encima de la cinta en dirección paralela a la superficie de la mesa y hacia afuera. Mantener la corriente de aire durante al menos 20 o 30 s describe el comportamiento de la cinta y trata de explicarlo.

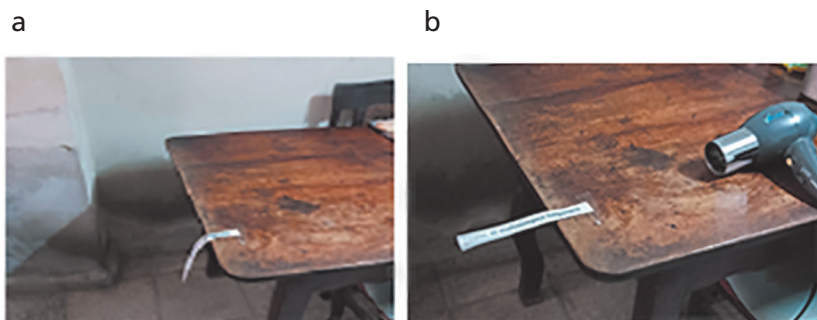


Fig. 1.3 La cinta es de un material ligero y se mueve al circular aire:
a) sin corriente de aire; b) con corriente de aire

¿Qué ha ocurrido? ¿Es lo que esperabas? ¿Puedes explicarlo?

Seguramente no ha resultado difícil hacer los experimentos y mucho menos describirlos, pero probablemente no ocurra lo mismo con las explicaciones. En efecto, para explicar los fenómenos ocurridos se necesita conocer y tener cierto dominio de las características, conceptos, leyes y algunos otros aspectos de la **dinámica de los fluidos**.

Precisamente, acerca de esos aspectos trata el tema que se propone estudiar en esta unidad. En general, la dinámica de los fluidos posee una extraordinaria importancia ya que permite explicar diversos fenómenos que ocurren en la naturaleza y muchas aplicaciones tecnológicas de uso cotidiano. Entre otras cosas permite responder en buena medida a preguntas como las siguientes:

¿Cómo los aviones pueden volar?

¿Por qué el viento de los huracanes puede levantar los techos de zinc, fibrocemento u otras láminas?

¿Cómo hay que lanzar una pelota para que haga alguna curva premeditada mientras está en el aire?

Las respuestas a estas preguntas necesitan de los mismos conocimientos que las explicaciones de los fenómenos observados en los experimentos. Comencemos por precisar algunos conceptos e ideas iniciales básicos e imprescindibles para el estudio de la mecánica de los fluidos.

1.1 Conceptos básicos

Fluidos

Recordemos que se les denomina fluidos a los medios continuos formados por sustancias en estado líquido o gaseoso. Por ejemplo, el agua, el alcohol, el aceite, el aire, el oxígeno, el nitrógeno, en las condiciones normales de nuestro clima son fluidos. Entre las propiedades fundamentales de los fluidos está la de “correr” (**fluir**) a través de tuberías o canales, o simplemente por encima de la superficie de un objeto cualquiera.

Fluido viscoso y no viscoso

Cuando un fluido **fluye** estando en contacto con otro fluido o con un sólido, existe una fuerza que actúa sobre él oponiéndose al movimiento, parecido a como ocurre con la fuerza de rozamiento en los sólidos, cuando la superficie de un cuerpo trata de deslizarse respecto a la de otro estando en contacto. En el caso de los fluidos, generalmente, el valor de la fuerza

que se opone al movimiento depende del valor de la velocidad relativa del movimiento y se denomina **fuerza de viscosidad**, a la propiedad en cuestión se les denomina **viscosidad** y al igual que entre superficies sólidas existe un **coeficiente de rozamiento**, en los fluidos existe un **coeficiente de viscosidad**.

No es difícil darse cuenta de que el alcohol, fluye más “fácil” que el agua y esta más fácil que la miel. ¿Cuál de los líquidos mencionados tendrá un mayor coeficiente de viscosidad, es decir, cuál será más viscoso? ¿Y cuál menos viscoso? Por otra parte, tampoco es difícil percatarse de que los gases poseen mucho menos viscosidad que los líquidos.

Cuando la viscosidad de un fluido es pequeña, y tiene muy poca importancia para el análisis de determinada situación, puede no tomarse en consideración sus efectos, o sea, la viscosidad se desprecia. En esas condiciones se dice que el fluido es **no viscoso**.



De la historia

A mediados del siglo XIX Clauch Luis Navier (1785-1836) y Sir Jorge Gabriel Stokes (1819-1903) tuvieron éxito en modificar las ecuaciones generales del movimiento de los fluidos viscosos, demostrando la posibilidad de ajustar la diferencia entre la teoría y la práctica.

Hacia fines del siglo XIX las investigaciones hechas por William Froude (1810-1879), Osborne Reynolds (1842-1912), John William Strutt, tercer barón de Rayleigh (1842-1919), entre otros, provoca el progreso de la aeronáutica conjuntamente con los trabajos de Frederick William Lanchester (1868-1946), Otto Lilienthal (1848-1896), Nikolai Yegórovich Zhukowski (1847-1921) y Ludwig Prandtl (1875-1953).

Presión

Sobre este concepto recordarnos que la presión se puede calcular como la razón entre el valor de una fuerza que se ejerce perpendicularmente sobre una superficie y el área de dicha superficie. Por ejemplo, si tu masa es de 60 kg y el área de la superficie de tus zapatos es de $0,046 \text{ m}^2$, ejercerás una presión de $12\,782,6 \text{ N/m}^2$ sobre el piso cuando estés parado en “posición de atención”, o lo que es lo mismo la presión será aproximadamente de 12,8 kPa. Se sugiere que verifique si estos resultados son correctos.

También se debe recordar que en los fluidos la presión se trasmite sin alteración en todas direcciones (lo que conocemos como Principio de Pascal),

o sea, se ejerce presión sobre las paredes del recipiente que los contiene y sobre los cuerpos inmersos en ellos, siendo la unidad básica de presión en el SI el pascal (Pa), el cual es igual a un newton por metro cuadrado (1 N/m^2). Como un pascal es una presión muy pequeña con frecuencia se emplean unidades que son múltiplos del pascal como son el hectopascal (hPa) y el kilopascal (kPa). ¿A cuántos pascales equivale un hectopascal? ¿y un kilopascal?

La atmósfera (atm), aunque no forma parte del sistema internacional de unidades, es aún una unidad de presión muy empleada en la práctica, su equivalencia con el pascal es $1 \text{ atm} = 1,012\,93 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, esta es la presión aproximada que ejerce la atmósfera de la Tierra sobre los cuerpos que se encuentran en su superficie a nivel del mar. *Puede ser interesante que estimes la fuerza que, en esas condiciones, ejerce la atmósfera sobre tu espalda. ¿Sabías que eres capaz de resistir tal fuerza sin darte cuenta de ello?*

Fluido compresible e incompresible

Si se toma una jeringuilla sin la aguja, se ocupa con aire hasta la mitad de su volumen, se obtura el orificio de salida con un dedo y se presiona sobre el émbolo, el volumen de aire dentro de la jeringuilla se puede reducir considerablemente, sin embargo, si se hace lo mismo con agua el volumen del fluido prácticamente no se puede reducir. En el primer caso se está ante un fluido **compresible** y en el segundo ante un fluido **incompresible**. En general los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles. Formula definiciones para **fluido compresible** y **fluido incompresible**. En ciertas situaciones los gases se pueden considerar incompresibles ¿Cuáles serán éstas?

Flujo volumétrico y flujo de masa

Se conoce que los fluidos se pueden desplazar con facilidad a través de tubos y canales con determinada rapidez. Una forma de caracterizar la rapidez con que determinado volumen de fluido se desplaza por una tubería u otro medio es mediante la magnitud física **flujo de volumen o flujo volumétrico (Q)** el cual se determina por el producto del área de la **sección transversal** del tubo (u otro lugar) por donde se desplaza el fluido y el valor de la velocidad del fluido perpendicular a dicha sección, o sea:

$$Q = A \cdot v$$

1.1

En hidráulica, a esta magnitud también se le llama gasto o caudal
¿En qué unidades debe expresarse el flujo volumétrico del fluido? ¿Qué significado físico posee este?

Si por dos tuberías cilíndricas circula agua con velocidades iguales y el diámetro de una de las tuberías es el doble que el de la otra ¿*Por cuál de las tuberías el flujo volumétrico es mayor?* ¿*Cuántas veces es mayor?*

Al responder la pregunta sobre el significado físico del flujo volumétrico seguramente te percataste de su importancia, en tanto que expresa el volumen de fluido que pasa por la sección transversal en la unidad de tiempo.

Por otro lado, el **flujo de masa** ($\dot{m}$) se refiere a la masa de un fluido que fluye a través de una sección transversal en una unidad de tiempo y su valor está dado por:

$$\dot{m} = \rho A v \quad 1.2$$

Su unidad de medida depende del tipo de fluido. En el SI, para un fluido incompresible como un líquido, su unidad de medida es el kilogramo por segundo (kg/s) y para un fluido compresible, como un gas, su unidad de medida es el metro cúbico por segundo estándar (m³/s), es decir, se toma como referencia la densidad estándar del gas. La diferencia esencial entre las magnitudes flujo volumétrico (gasto) y flujo de masa es que la primera tiene en cuenta la densidad del fluido; y la segunda es la masa de fluido que atraviesa la sección transversal, de área A , en una unidad de tiempo.

Fluido ideal o perfecto

Como sabemos, en las ciencias, para el estudio de los diferentes sistemas y sus cambios se emplean **modelos**, es decir, una idealización de lo que se estudia considerando los aspectos y características esenciales en dependencia del propósito de realización del estudio y descartando aspectos poco relevantes. Por ejemplo, el modelo del cuerpo puntual que ya utilizaste para describir el movimiento de traslación de los cuerpos. También el movimiento armónico simple, el choque elástico e inelástico, etc. son también modelos que ya has utilizado. ¿Pudieras mencionar algunos otros destacando los elementos que se consideran y algunos de los que se desprecian por considerarlos poco significativos?

Para el estudio del movimiento de los fluidos también se emplean modelos, uno de ellos es el de **fluido ideal** o **perfecto**.

Un fluido es ideal o perfecto cuando es incompresible y no viscoso, o sea, el volumen de cierta porción de fluido no se puede variar sometiéndolo a presión por muy grande que esta sea y cuando este fluido se desplaza no recibe ninguna oposición por parte de otras porciones de fluido o de los otros objetos con los cuales entre en contacto.

En la práctica varios fluidos, bajo ciertas condiciones y para algunos fines, se pueden considerar ideales o perfectos. En este texto solo se considerarán fluidos perfectos a no ser que se advierta lo contrario en algún caso.

¿Sabías que...?

Los delfines logran una eficiente propulsión mientras nadan, esto es posible dada su capacidad de controlar la turbulencia al mover su piel. Esta peculiaridad se ha extrapolado en la construcción de diseños de aviones, permitiendo que estos reduzcan el arrastre de la turbulencia.

Línea de corriente

Como todas las sustancias, los fluidos también están compuestos por pequeñas partículas. Cuando un fluido **se mueve**, sus partículas siguen determinadas trayectorias, a dichas trayectorias se les denomina **líneas de corriente**, una característica que poseen las líneas de corriente es que las velocidades de las partículas son tangentes a ellas en cada uno de sus puntos (figura 1.4).

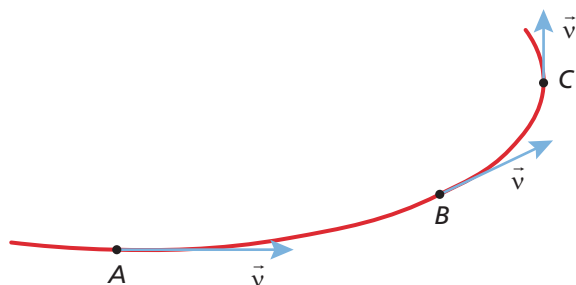


Fig. 1.4 Línea de corriente

Tubo de corriente

A un haz de líneas de corriente se les denomina **tubo de corriente** (figura 1.5). Una característica importante que poseen las líneas de corriente que forman un tubo es que **no se cortan**, si se cortaran en un mismo punto del fluido las partículas que pasaran por él tendrían a la vez dos velocidades, lo que es absurdo. Las líneas de corriente se dibujan de tal modo que en la zona donde la velocidad del fluido es mayor las líneas están más unidas y más separadas donde la velocidad es menor



Fig. 1.5 ¿En qué parte del tubo de corriente representado la velocidad del fluido en mayor y en cuál menor?

Flujo laminar

Cuando el fluido se mueve con sus partículas “organizadas” en capas (láminas) como están las páginas de un libro y durante el movimiento de unas capas sobre otras se mantiene el orden, por ejemplo en un tubo de corriente cilíndrico, la capa cilíndrica de partículas que están en contacto con la pared es la misma a todo lo largo del tubo, la capa que le sigue a esa, conserva esa posición a la tercera capa, de afuera hacia el centro, les ocurre lo mismo y así sucesivamente, se está en presencia de **un flujo laminar**, si el orden entre las capas no se conserva con el tiempo el flujo es turbulento. A menos que se diga lo contrario, en este libro se tratará con **flujos laminares**.

Flujo estacionario

Un fluido que se mueve de tal forma que la velocidad de todas las partículas que arriban a determinado punto es constante en el tiempo, se dice que está en **régimen estacionario**. Observa que, en este caso, se trata de la velocidad de las partículas en cada uno de los puntos del fluido, en los que se mantienen las mismas características y no la velocidad de cada partícula, la cual puede variar de un punto a otro.



De la historia

El ser humano, desde la antigüedad, se interesó por el conocimiento de las propiedades de los fluidos, para poder aprovecharlos en el desarrollo de su vida y obtener beneficios de ello; construyó pozos, operó ruedas hidráulicas en los ríos para moler los granos, construyó aparatos de bombeo y a medida que las ciudades fueron creciendo se construyeron mayores acueductos, como los de la ciudad de Roma.

Da Vinci (1452-1519) diseñó y construyó importantes obras hidráulicas, estudió el vuelo de los pájaros y desarrolló algunas ideas sobre la fuerza de sustentación, ideas que contribuyeron al desarrollo de la hidráulica. Otros que aportaron valerosos conocimientos a la edificación de la mecánica de los fluidos fueron: Galileo (1564-1642), Evangelista Torricelli (1608-1647), Blaise Pascal (1623-1662), Isaac Newton (1643-1727), Henry Pitot (1695-1771) y Daniel Bernoulli (1700-1782).

Comprueba tus conocimientos

1. ¿A qué se denomina fluido? ¿Cuándo un fluido se puede considerar no viscoso?
2. ¿Cómo se calcula la presión y en que unidades se mide? ¿Qué plantea la ley de Pascal?
3. ¿Cuándo un fluido se puede considerar incompresible y cuando compresible? De ejemplos de cada uno.
4. ¿A qué se llama flujo volumétrico y a qué flujo de masa? ¿Cómo se calculan?
5. ¿Cuándo un fluido se puede considerar ideal o perfecto?
6. ¿Qué es una línea de corriente? ¿Qué es un tubo de corriente? ¿Cuándo una corriente de fluido es laminar?
7. ¿Cómo afecta la viscosidad del líquido al flujo estacionario en un tubo?

1.2 Ecuación de continuidad

Considera un tubo por el que fluye un fluido incompresible y no viscoso a régimen laminar y estacionario (figura 1.6). Son A_1 y A_2 las áreas de las secciones transversales 1 y 2 del tubo; supón que todas las partículas del fluido que arriban a la sección 1 tienen la misma velocidad de módulo v_1 y

las que llegan en la sección 2 una velocidad de módulo v_2 . Si no fuera así, ¿sería estacionario el flujo?

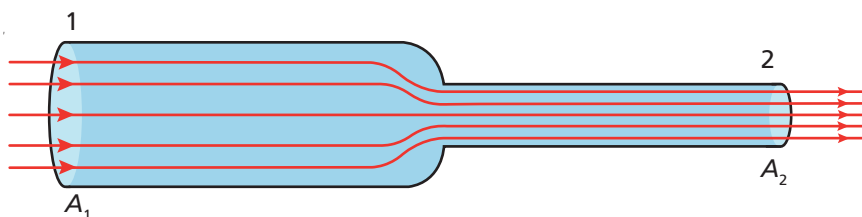


Fig. 1.6 Tubo por el que se mueve un fluido incompresible y no viscoso

Si en un intervalo de tiempo dado, por la sección 1 del tubo entra un determinado volumen de fluido, por la sección 2 debe salir el mismo volumen de fluido en el mismo tiempo y en general, en cualquier sección del tubo ocurrirá lo mismo. Por lo tanto, el flujo volumétrico (ecuación 1.1) será el mismo a través del tubo, o sea:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \dots A_n v_n \quad 1.3$$

Esto significa que para cualquier parte del tubo el flujo volumétrico no cambia:

$$Av = \text{constante} \quad 1.4$$

Si el fluido es incompresible (su densidad ρ no cambia) al multiplicar la ecuación 1.2 por la densidad, tomaría la forma:

$$\rho Av = \text{constante} \quad 1.5$$

Este resultado nos indica que el flujo de masa será el mismo en cualquier parte del tubo.

De hecho, la ecuación de continuidad es una consecuencia de la ley de conservación de la masa.

¿? ¿Sabías que...?

Al flujo volumétrico también se le acostumbra llamar gasto o caudal y se suele simbolizar de igual manera que el flujo o por la letra Q y al flujo másico también se le llama gasto másico o caudal másico y se usa el mismo símbolo que para el flujo másico.

Comprueba tus conocimientos

8. ¿Cuáles características de los fluidos les diferencia de los sólidos?
9. ¿Qué es un tubo de corriente?

10. ¿Qué se entiende por gasto?

11. Cuando riegas con una manguera las plantas de un huerto o jardín y deseas que el agua salga con mayor velocidad (para que llegue más lejos) por el extremo de la manguera, ¿aumentarías o disminuirías el área de la sección transversal de la salida del tubo? Explica tu selección sobre la base de la ecuación de continuidad.

12. Idea un método para medir el gasto de la llave de agua del fregadero o del baño de la casa y mídelo, sin despilfarrar el agua. Mide el área de la sección transversal del tubo (extremo de la llave) por donde sale el agua. ¿Con qué rapidez sale el agua por el orificio de la llave? Haz una lista de las precauciones que tuviste que tomar para evitar errores en la medición.

1.3 Ecuación de Bernoulli

Supón un fluido ideal que se mueve a través de un tubo de corriente, de izquierda a derecha, como se ilustra en la figura 1.7, de manera que el fluido contenido en la región AB se desplaza a la posición CD en un pequeño intervalo de tiempo Δt .

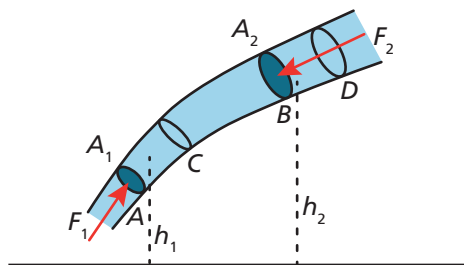


Fig. 1.7 Desplazamiento de una masa de fluido a través de un tubo de corriente

Determinemos la variación de la energía mecánica experimentada por la masa del fluido en el proceso, durante el intervalo de tiempo Δt .

El trabajo resultante sobre la masa del fluido será igual a la suma del trabajo (W_1) debido a la fuerza F_1 , que se calcula multiplicando la presión que realiza el fluido que sube por el área A_1 ; el trabajo (W_2) realizado por la fuerza F_2 debido al peso del fluido que está por encima de la sección D , que se calcula multiplicando la presión (P_2) (por el área A_2 , y el trabajo (W_3) realizado por la fuerza de gravedad que actúa sobre la masa de fluido, que asciende y es igual a $-mg\Delta h$.

13

Ahora bien, Si la velocidad del fluido en la sección 1 es $\vec{v}_1$ y en la sección 2 es $\vec{v}_2$, la variación de la energía cinética del fluido al pasar de 1 a 2 es

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad 1.12$$

Y la variación de la energía potencial gravitatoria será:

$$\Delta E_{pg} = mgh_2 - mgh_1 \quad 1.13$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.11, 1.12 y 1.13 en 1.8 tenemos que:

$$P_1A_1l_1 - P_2A_2l_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_2 - mgh_1 \quad 1.14$$

Como el volumen de cada porción se puede calcular por la fórmula $V = Al$, podemos escribir la ecuación 1.14 como:

$$P_1V_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = P_2V_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \quad 1.15$$

Sugerencia: haz los pasos para pasar de la ecuación 1.14 a la 1.15.

Como el fluido es ideal, su densidad (ρ) es la misma en todo el tubo y se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 1.16$$

Despejando el volumen en 1.16 y sustituyendo en 1.15 se obtiene que:

$$P_1 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = P_2 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \quad 1.17$$

Sugerencia: reflexiona sobre la consideración implícita de que las masas de las porciones de fluido se han considerado iguales.

Dividiendo ambos miembros de la ecuación por la masa m y multiplicando por la densidad ρ obtenemos:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad 1.18$$

Esto significa que para cualquier punto del fluido:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad 1.19$$

La ecuación 1.18 (o la 1.19) es conocida por **Ecuación de Bernoulli** para un fluido incompresible y no viscoso que se mueve a régimen estable, o sea, para un fluido ideal o perfecto.



De la historia

Daniel Bernoulli (1700-1782), profesor del departamento de botánica y anatomía (figura 1.8). En San Petersburgo trabajó en la cátedra de Física donde compartió con el matemático Leonard Euler. En 1738 publicó su obra sobre Hidrodinámica, en la que expone lo que más tarde sería conocido como Principio de Bernoulli.



Al término P se llama **presión estática**, que es la que ejerce el fluido contra las paredes del recipiente que lo contiene. El parámetro $\frac{1}{2}\rho v^2$ recibe el nombre de **presión dinámica** o **densidad de energía cinética** (razón entre la energía cinética y el volumen). El término ρgh se denomina **presión hidrostática** o **densidad de energía potencial**. Nota que, en correspondencia con esto, la presión estática también debe ser una densidad de energía.

¡Cuidado!

Además de a la presión P , a los otros dos términos de la ecuación de Bernoulli se les acostumbra a llamar también presiones. De este hecho se puede inferir, de forma incorrecta, que la ecuación constituye una especie de ley de conservación de la presión, pero la presión no es una magnitud extensiva y, por ende, no es una magnitud conservativa.

Sugerencia: reflexiona sobre la afirmación de que el término P (presión estática) es una densidad de energía. También puede resultar útil que escribas la ecuación de Bernoulli para el caso en que el fluido se mueva horizontalmente y para el caso en que no se mueva.



¿Sabías que...?

La ecuación de Bernoulli está en correspondencia con el principio de conservación de la energía. Cuando el fluido es viscoso, parte de la energía se transforma en energía calorífica, de manera que la ecuación de Bernoulli toma la forma:

$$P_1 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = P_2 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 + Q$$

Donde Q es la energía calorífica generada por el fluido viscoso.

Examinemos ahora algunos casos particulares de la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

Movimiento del fluido por una tubería horizontal

Cuando el movimiento del fluido es en la dirección horizontal, la ecuación 1.19 toma la forma $P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$, ya que la razón entre la energía potencial gravitatoria y el volumen o presión hidrostática es igual para ambos puntos, pues al estar en la misma línea de corriente se encuentra a igual altura. La presión estática que ejerce el fluido contra las paredes del recipiente, figura 1.9, se mide con tubos manométricos.

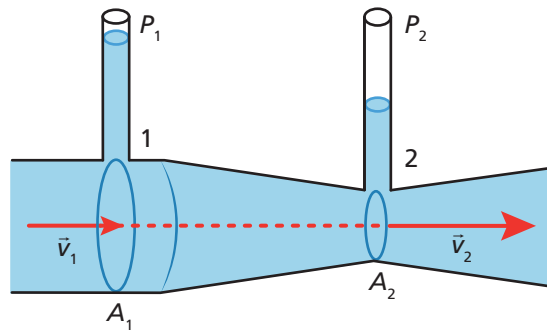


Fig. 1.9 Movimiento de un fluido por un tubo de corriente en posición horizontal

Cada tubo manométrico mide el valor de la presión estática en la región donde se encuentra. En este caso la indicación de los manómetros es que la presión estática es mayor en la región 1 que en la 2. Esto se corresponde con el hecho de que, en correspondencia con la ecuación de continuidad (1.1), la velocidad en la región 1 es menor que en la región 2. En estas condiciones la ecuación de Bernoulli (1.13) indica, que como la presión dinámica es menor, la presión estática es mayor.

Otra manera, equivalente, de explicar este hecho es la siguiente: como en este caso la ecuación 1.19 toma la forma,

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Si la sección transversal $S_1 > S_2$ entonces, de la ecuación de continuidad $v_1 < v_2$, de manera que:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 < \frac{1}{2}\rho v_2^2, \text{ y por ende } P_1 > P_2.$$

Circulación del fluido por una tubería vertical de sección uniforme

En este caso la ecuación de Bernoulli adopta la forma: $P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho gh_2$, ya que el tubo es de sección uniforme, por lo que la velocidad del fluido es igual para toda la tubería.

En este caso los manómetros medirán las presiones estáticas; el manómetro en la posición 2 indica un valor de presión estática mayor que en el punto 1 por tener menor altura y menor presión hidrostática (razón entre la energía potencial gravitatoria y el volumen) como se muestra en la figura 1.10.

Al realizar un análisis de la ecuación de Bernoulli, como la velocidad del fluido es la misma para toda la tubería, la ecuación de Bernoulli queda como:

$$P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho gh_2$$

Como $h_1 > h_2$, entonces $\rho gh_1 > \rho gh_2$ y tiene que cumplirse que $P_1 < P_2$.

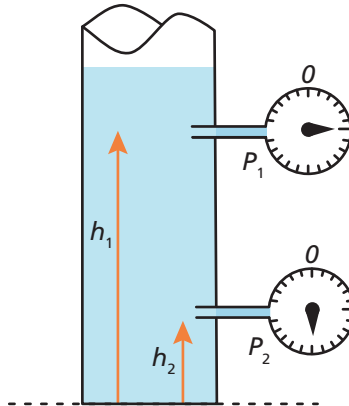


Fig. 1.10 Valores de la presión estática entre dos puntos en un tubo de corriente en posición vertical

Tubo de corriente de fluido sin paredes

Si observamos el chorro de agua que sale por una llave o grifo de los que existen en nuestras casas que sale como un flujo laminar, notamos que el tubo de corriente va estrechándose a medida que desciende (figura 1.11).

Si la diferencia de altura entre los puntos seleccionados en el tubo es pequeña la presión atmosférica se puede considerar igual en ambos, entonces la presión estática es considerada la misma para el tubo de corriente.

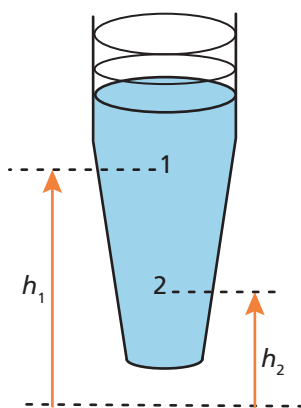


Fig. 1.11 Movimiento de un fluido en un tubo de corriente sin paredes

Se nota que el tubo de corriente se estrecha, debido a que aumenta la velocidad del agua al caer por gravedad. Para esta situación la ecuación de Bernoulli entonces adopta la forma:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2, \text{ ya que } P_1 = P_2$$

Como $h_1 > h_2$, planteamos que $\rho g h_1 > \rho g h_2$, entonces $\frac{1}{2}\rho v_1^2 < \frac{1}{2}\rho v_2^2$ porque la velocidad del fluido aumenta a medida que el agua cae y si aumenta la velocidad del fluido, disminuye la sección transversal.

Sugerencia. Demuestra que esto debe ser así para que la ecuación de continuidad se cumpla.

Problema resuelto 1.1

Un tubo cilíndrico en cierta región (1) tiene un diámetro de 20 cm y en otra sección contigua (2) 8,0 cm. Si la velocidad del fluido en la sección 2 es de 80 cm/s, el fluido es incompresible y el régimen estacionario, ¿cuál será el valor de la velocidad con que viaja en la primera sección?, ¿cuál es el gasto en la tubería?

Solución:

En correspondencia con los datos del problema este se puede resolver directamente a partir de la ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1}$$

Si consideramos que las partículas que están en la parte superior del recipiente están en reposo resulta que $v_1 = 0$ además como la superficie libre y el orificio están abiertos a la atmósfera entonces $P_1 = P_2$ y la ecuación de Bernoulli puede escribirse como:

$$\rho gh_1 = \frac{1}{2}v_2^2 + \rho gh_2$$

$$\rho gh_1 - \rho gh_2 = \frac{1}{2}v_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{2\rho g(h_1 - h_2)}$$

pero como $h_1 - h_2 = h$

$$v_2 = \sqrt{2\rho gh}$$

La expresión obtenida tiene la misma forma que la estudiada para la caída libre de un cuerpo.

Comprueba tus conocimientos

- 13.** ¿A partir de qué ley se obtiene la ecuación de Bernoulli?
- 14.** Di el nombre de cada uno de los sumandos que conforman la ecuación de Bernoulli.
- 15.** Si observas la superficie del agua de un río notarás que en algunas partes del curso de este, el agua viaja con mayor velocidad que en otras, si el ancho del río es el mismo, ¿tendrá el río la misma profundidad en todo su curso? Justifica tu respuesta.
- 16.** Los tanques de agua se encuentran en un edificio en la parte de la azotea, ¿a qué parte llegará el agua con mayor presión estática, a la planta baja o al piso más alto? ¿Será igual la presión sobre las paredes del tubo por donde se distribuye el agua cuando las llaves están abiertas que cuando están cerradas? Explica las respuestas basándote en la ecuación de Bernoulli.
- 17.** Los barcos de alta velocidad no pueden moverse juntos (a poca distancia uno del otro) en la misma dirección y sentido. Está prohibido por la seguridad marítima. Observa la figura 1.13 y explica basándote en las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad al comparar las zonas A, B y B'. ¿Por qué puede producirse una colisión entre ellos?

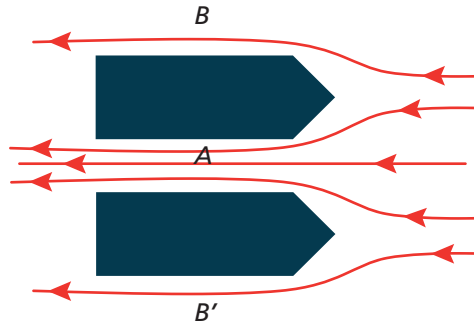


Fig. 1.13

Cuando los ciclones tropicales o huracanes azotan las tierras de nuestro país, los fuertes vientos al golpear la cubierta y los techos de las viviendas provocan que estas se desprendan y salgan volando. ¿Qué explicación física, basada en la ecuación de Bernoulli, puedes dar a este fenómeno?

1.4 Algunas aplicaciones de la dinámica de los fluidos

Fuerza de sustentación en los aviones

Observemos cómo se comportan las líneas de corriente del aire al pasar por las proximidades del ala de un avión. En la figura 1.14 se muestra este comportamiento para un observador situado en el avión.

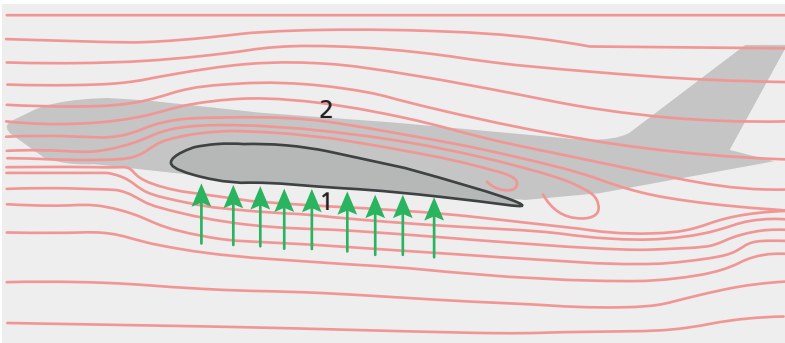


Fig. 1.14 Líneas de corriente respecto al ala de un avión

En este caso la presión hidrostática es la misma en los dos puntos 1 y 2, pues la diferencia de alturas es muy poca por lo que la diferencia de presión atmosférica entre la parte superior e inferior del ala del avión no es apreciable, entonces, la presión dinámica es mayor en la zona 2 (la parte

superior), ya que las partículas de aire que llegan juntas a la parte delantera del ala no lo hacen al arribar a la parte trasera de esta. Las partículas de aire que viajan por la parte superior del ala viajan con mayor rapidez que las que transitan por la parte inferior, por eso las partículas que iban juntas en la parte delantera del ala no se vuelven a encontrar una vez que hayan rebasado el ala, por eso las líneas de corriente del fluido se representan más unidas en la zona 2 que en la zona 1.

En la región 2 la velocidad del fluido es mayor, entonces la presión estática es menor en la región 2 que en la región 1. Para estas condiciones se cumple la ecuación de Bernoulli de la siguiente forma.

$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$, de donde $v_1 > v_2$, por ende $\frac{1}{2}\rho v_1^2 > \frac{1}{2}\rho v_2^2$ y como resultado de esto $P_1 > P_2$, entonces en el avión surge una fuerza que contribuye de forma importante a la fuerza ascensional que mantiene al avión en vuelo.

En la explicación anterior se trata de un avión en vuelo, mientras que se hace referencia a la rapidez del fluido y no a la del avión ¿Será eso correcto? Argumenta.

También se puede razonar de la manera siguiente a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Reagrupando términos:

$$P_1 - P_2 = \left(\rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \right) - \left(\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 \right)$$

Eliminando los paréntesis:

$$P_1 - P_2 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \rho gh_1 - \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

$$P_1 - P_2 = \rho gh_2 - \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

$$P_1 - P_2 = \rho g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}\rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Como la diferencia de alturas se puede despreciar se tendrá que:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Como la diferencia de alturas es cero (0) la diferencia entre los dos términos que contienen la altura es nula y entonces al despejar v_1^2 en la ecuación anterior se tiene:

$$P_1 - P_2 = \rho \frac{A_1^2 v_1^2}{2A_2^2} - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)$$

$$v_1^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2} \right)}$$

$$v_1^2 = A_2^2 \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}$$

Al observar la figura se puede ver que el líquido en las ramas del manómetro está en **equilibrio**, para lo cual las presiones hidrostáticas totales en ambas ramas deben ser iguales. Si se toma como referencia el nivel que tiene el líquido manométrico en la rama izquierda, se tiene que la presión en la misma en el nivel indicado será:

$P_1 + \rho gh$ y en el caso de la rama derecha será $P_2 + \rho g(h - \Delta h) + \rho' g \Delta h$ como ambas presiones son iguales, entonces:

$$P_1 + \rho gh = P_2 + \rho g(h - \Delta h) + \rho' g \Delta h \text{ de donde se llega a:}$$

$$P_1 - P_2 = (\rho' - \rho) g \Delta h$$

Al sustituir este valor de $P_1 - P_2$ en la ecuación:

$$v_1^2 = A_2^2 \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)} \text{ se tiene } v_1^2 = A_2^2 \frac{2(\rho' - \rho) g \cdot h}{\rho(A_1^2 - A_2^2)} \text{ y por tanto:}$$

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) g \cdot h}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Aplicando la ecuación de continuidad y de Bernoulli para una tubería horizontal llegamos a la ecuación: $v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$ donde ρ' es la densidad del líquido dentro del manómetro y ρ la densidad del fluido que viaja por la tubería. Con esto medimos la velocidad del fluido en la sección 1 por la que se desplaza el gas.

Tubo de Venturi

El tubo de Venturi se emplea en los carburadores de los vehículos automotores, en los atomizadores para fumigar, en frascos de perfumes (figura 1.16), en las pistolas de pintar y muchos otros dispositivos. En todos estos casos el líquido sale “pulverizado”.



Fig. 1.16 Aplicaciones del tubo de Venturi

En la figura 1.17 se muestra el principio de funcionamiento de estos dispositivos.

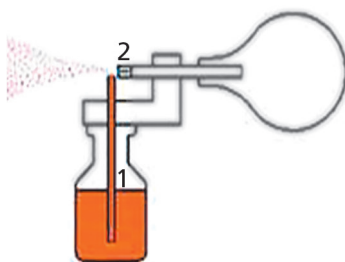


Fig. 1.17 Al comprimir la perita el aire sale, por la boquilla con determinada velocidad, la presión estática en la región 2 decrece y el líquido asciende

En la zona 1 actúa la presión atmosférica, en esta zona no hay presión dinámica que, si existe en la región 2 dada por la velocidad con que sale el aire expulsado por la perita, al existir mayor presión dinámica, en la región 2 disminuye la presión estática y el líquido a pulverizar sube. No tenemos en cuenta la diferencia de presión hidrostática entre 1 y 2 ya que la diferencia de alturas es muy poca, como hemos considerado en casos anteriores. La ecuación de Bernoulli queda como $P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$ por lo que $P_1 > P_2$, por eso el líquido sube.

Tubo de Pitot

El tubo de Pitot, figura 1.18, se emplea para medir la velocidad con que se mueve un cuerpo **con respecto** a un fluido gaseoso.

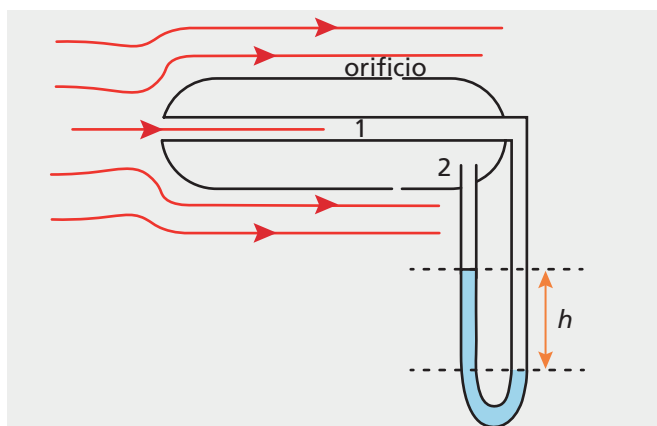


Fig. 1.18 Tubo de Pitot

La estructura del dispositivo tiene un estrechamiento por donde entra el gas a la rama derecha del manómetro hasta que se equilibren las presiones y el gas se estanca (su velocidad se hace cero), así el gas en la región 1 está en reposo. La región 2 está conectada con el exterior por lo que la rama izquierda recibe la influencia de la presión estática del fluido en movimiento en la parte exterior. La diferencia de alturas del gas es tan pequeña que no se tiene en cuenta la diferencia de presión hidrostática. Entonces la ecuación de Bernoulli se puede escribir:

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2$$

De donde se obtiene que:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = P_1 - P_2$$

Por el equilibrio de presiones en el manómetro se tiene que:

$$P_1 - P_2 = \rho' g \Delta h \text{ por lo que se puede escribir } \frac{1}{2} v^2 = \rho' g \Delta h \text{ de esta relación}$$

se llega a que $v = \sqrt{\frac{2\rho' g \Delta h}{\rho}}$ y así se puede hallar la velocidad del fluido.

Los fenómenos relacionados con la ecuación de Bernoulli no son raros, pero **sus explicaciones** son poco conocidas por las personas no especializadas en esta materia. Veamos algunos ejemplos:

Medicina

En oxigenoterapia, en el caso de los aerosoles, funcionan a partir del principio de Venturi, el cual está basado en el principio de Bernoulli.

Chimeneas

Las chimeneas son altas para aprovechar la velocidad del viento que es más constante y elevada a mayores alturas. Cuanto más rápidamente sopla el viento sobre la boca de una chimenea, más baja es la presión estática y mayor es la diferencia de presión entre la base donde se producen los gases y la boca de la chimenea (figura 1.19), en consecuencia, los gases de combustión suben. Si la velocidad del viento es cero la chimenea también funciona ya que el humo asciende por convección.



Fig. 1.19

Beisbol

El efecto Magnus, denominado así en honor al físico y químico alemán Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), es el nombre dado al fenómeno físico por el cual la rotación de un objeto afecta a la trayectoria de este a través de un fluido viscoso, en particular el aire, es el resultado de varios fenómenos, incluido el principio de Bernoulli y el proceso de formación de la capa límite en el fluido situado alrededor de los objetos en movimiento. Este efecto fue descrito por primera vez por el físico alemán Heinrich Magnus en 1853.

Debido a ese fenómeno de arrastre del fluido por parte de los sólidos que se mueven en su interior, la presión estática en la zona próxima al sólido es menor que en regiones más alejadas donde el fluido se mueve más lento o está en reposo. Esta diferencia de presiones provoca que el fluido ejerza fuerzas sobre los sólidos que se encuentran cercanos al sólido que se mueve, dirigidas hacia este último. Popularmente se dice que los camiones, los trenes y otros vehículos “atraen” a las personas que se encuentran cerca de las vías por donde pasan.

El efecto Magnus es el que propicia que los lanzadores de beisbol “lancen” curvas (figura 1.20 a). Imagina que la pelota, representada en la figura, se lanzó de tal modo que rota en sentido antihorario; como la pelota arrastra consigo las capas de aire que están próximas a ella, el aire contiguo recibe el efecto del movimiento combinado de la pelota por la rotación; las partículas de aire que se encuentran encima de la pelota tienden a moverse hacia atrás y las que están debajo tienden a hacerlo hacia adelante, como consecuencia de la traslación todas las partículas tienden a moverse hacia adelante. Por tanto, el aire que rodea la pelota tiene diferentes velocidades por la parte de abajo que por la de arriba, se mueve más rápido por la parte inferior de la pelota que por la superior, por lo que la presión que ejerce el aire sobre la pelota es mayor de arriba hacia abajo que a la inversa y se puede lograr así una curva hacia abajo (figura 1.20 b). ¿Cómo podrán lograrse curvas hacia afuera, hacia adentro, hacia arriba?

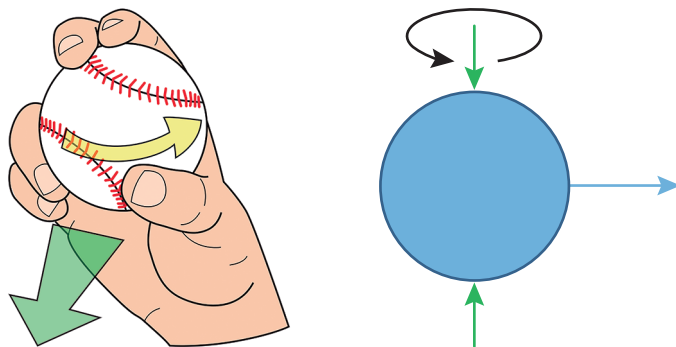


Fig. 1.20

¡Cuidado!

El proceso de formación de la capa límite en el fluido situado alrededor de los objetos en movimiento, fue descrito por primera vez por el físico alemán Heinrich Magnus en 1853.

Esta misma causa explica el peligro que encierran para los bañistas los rápidos de los ríos y el efecto absorbente de los remolinos de agua. Se puede calcular que la corriente de agua de un río cuya velocidad sea de $1,0 \text{ m/s}$ es capaz de arrastrar al cuerpo de un hombre con una fuerza de ¡300 N! Resistirse a esta fuerza no es cosa fácil, sobre todo en el agua, donde el peso de nuestro cuerpo no nos ayuda a mantener la estabilidad. El arrastre que producen los trenes rápidos sobre los cuerpos próximos también se explica por el teorema de Bernoulli. Un tren que pase con una velocidad de 50 km/h arrastrará a las personas que estén cerca con una fuerza de aproximadamente 80 N.

En la cotidianidad

Para garantizar el ahorro de agua en los baños, lavamanos, descargues de tazas sanitarias, se usan cierres automáticos, al salir el agua cuando se oprime un botón o palanca, como aparece en la figura 1.21, estas se cierran sin necesidad de ser manipuladas luego de un tiempo prudencial. Esto es posible debido a un mecanismo (que cuenta el flujo de agua y libera el resorte cuando el flujo se iguala al predeterminado para satisfacer determinada necesidad.

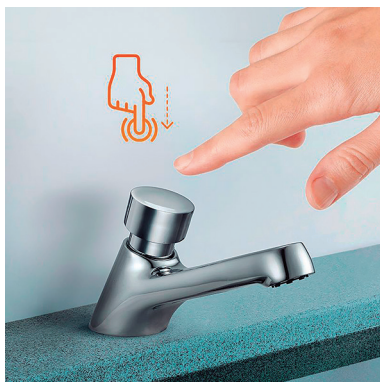


Fig. 1.21 Grifo temporizador

Problema resuelto 1.3

Por una tubería horizontal que tiene un diámetro de 0,20 m pasa agua ($\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$) y ejerce una presión estática de 2,60 atm, a continuación el tubo se reduce y posee un diámetro de 0,10 m y la presión estática en esa zona es de 2,40 atm. Determina el valor del gasto $\left(1\text{ atm} = 1,013 \cdot \frac{10^5\text{ N}}{\text{m}^2}\right)$.

Solución:

La situación planteada (figura 1.22) se puede representar de la manera siguiente:



Fig. 1.22

Se conoce que se tiene una tubería horizontal por la cual circula agua cuya densidad es de $1\,000\text{ kg/m}^3$. La sección transversal del tubo no tiene el

mismo valor en todas sus partes: en la región 1 el valor del diámetro es de 0,20 m y en la sección 2 el diámetro es de 0,10 m, además se conoce que la presión estática (sobre las paredes del tubo) en la región 1 es de 0,60 atm y en la región 2 es de 0,40 atm.

Como el agua es un fluido prácticamente incompresible y no viscoso y dadas las condiciones, su rapidez no debe ser muy elevada, puede considerarse muy próximo a ser un fluido ideal que fluye con régimen laminar y estacionario.

Como se solicita encontrar el gasto que es una magnitud que se determina por:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Las áreas se pueden calcular con la fórmula del área de un círculo:

$$A = \pi \cdot r^2$$

Donde A es el área y r el radio del círculo.

Las velocidades de las secciones se pueden determinar con las ecuaciones de la hidrodinámica, continuidad y Bernoulli.

La primera plantea que $A_1 v_1 = A_2 v_2$ y la segunda expresa que:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

donde ρ es la densidad del fluido, que en este caso es constante, h es la altura a la que se encuentra el punto para el cual se hacen los cálculos.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

$$v_2 = \frac{\pi \cdot r_1^2}{\pi \cdot r_2^2} v_1$$

Como el tubo es horizontal la diferencia de alturas de ambas secciones es cero. $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$.

Al sustituir en esta ecuación v_2 tenemos:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{r_1^4}{r_2^4} v_1^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 \right) \text{ el término } \frac{1}{2} \rho v_1^2 \text{ es factor común queda:}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{r_1^4}{r_2^4} - 1 \right),$$

Al despejar v_1^2 en la ecuación anterior:

$$v_1^2 = \frac{2r_2^4 (P_1 - P_2)}{\rho(r_1^4 - r_2^4)}$$

Por tanto $v_1 = r_2^2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(r_1^4 - r_2^4)}}$

El gasto $Q = A_1 v_1$ y $A_1 = \pi \cdot r_1^2$

La ecuación solución será:

$$Q = \pi \cdot r_1^2 \cdot r_2^2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(r_1^4 - r_2^4)}}$$

Al disponer de todos los datos se obtiene el valor de la magnitud.

Problema resuelto 1.4

Para una persona normal sin enfermedades cardiovasculares la presión arterial fluctúa entre los valores sistólico de 120 mm de Hg y diastólico de 80 mm de Hg que son los valores de presión arterial normales. En la arteria aorta la velocidad media de la sangre es de 33 cm/s y su sección transversal tiene un área de 2,5 cm². Determina el gasto en la arteria.

Solución:

$$Q = A_1 \cdot v_1$$

$$Q = 2,5 \text{ cm}^2 \cdot 33 \text{ cm/s}$$

$$Q = 82,5 \text{ cm}^3/\text{s}$$

En caso de un accidente donde la arteria aorta de una persona se cerce-ne completamente ¿cuánto tiempo demorará en salir un litro de sangre?

Comprueba tus conocimientos

19. Selecciona dos aplicaciones prácticas relacionadas con la ecuación de Bernoulli y explícalas.

1.5 Ley de Stokes. Coeficiente de viscosidad

La viscosidad en el movimiento de los fluidos puede considerarse como un caso análogo a la fuerza de fricción en el movimiento relativo entre las superficies en contacto de los sólidos. Cuando el fluido es visco-so, al moverse una capa se mueven las subyacentes, apareciendo fuerzas

tangenciales¹ entre las capas de fluido en movimiento relativo, en este movimiento se disipa energía. Imaginemos que la figura, 1.23 a, es un paquete de hojas de papel de las que normalmente se usan en las oficinas, si se aplica una fuerza paralela a las hojas, el paquete se deforma (figura 1.23 b), este está formado por delgadas capas unas sobre otras (las hojas son comparables con pequeñas capas), el resultado de la deformación es el desplazamiento relativo de unas capas respecto a las adyacentes, tal como se muestra (figura 1.23 c).

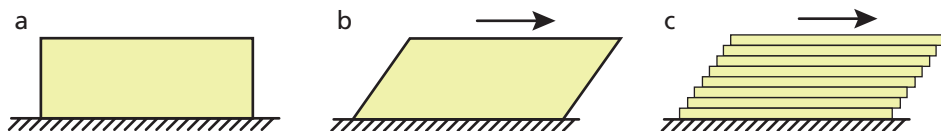


Fig. 1.23

La mecánica de los fluidos estudia el movimiento relativo de estos en tuberías o cuerpos que se mueven en su seno. Este estudio puede hacerse a bajas velocidades. En el caso de que el régimen del fluido sea laminar, es como si el fluido estuviese compuesto por láminas muy finas que se deslizan unas respecto a otras con un rozamiento interno entre ellas; en este régimen de flujo laminar se tiene en cuenta el coeficiente de viscosidad (η) para los fluidos viscosos. Este coeficiente η es un análogo para los líquidos viscosos del coeficiente de rozamiento por deslizamiento en el caso de las superficies sólidas.

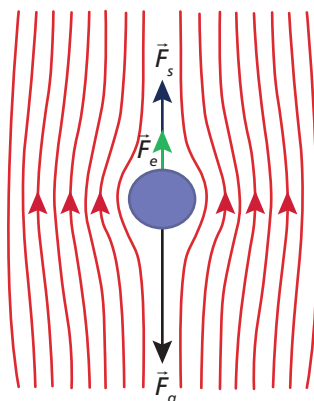
En 1850 C. G. Stokes mostró que si el flujo es laminar la fuerza de arrastre, que se opone al movimiento del cuerpo dentro del fluido, ejercida sobre un cuerpo esférico de radio r que se mueve a velocidad v en el seno de un fluido de coeficiente de viscosidad η viene dada por:

$$F_s = -6\pi\eta rv \quad 1.20$$

La ecuación anterior es una expresión matemática de la Ley de Stokes

El signo negativo indica que la fuerza de Stokes es siempre contraria al sentido de la velocidad. En esta ecuación las unidades fundamentales son: r en m, v en m/s, F_s en N y η en N · s/m². También se utiliza, en honor al científico francés Poiseuille, la unidad poise, que tiene como símbolo P y equivale a g/cm·s. de manera que $1P = \frac{g}{cm} \cdot s^{-1}$, o lo que es equivalente $1P = 0,1 \text{ Ns/m}^2$.

¹ Las fuerzas tangenciales son las que aparecen entre dos superficies de cuerpos en contacto cuando una tiende a deslizarse sobre la otra, o se deslizan, y son paralelas a las superficies.



El coeficiente de viscosidad η depende de la naturaleza del fluido y de la temperatura cuanto mayor es este coeficiente más se diferencia el fluido del fluido perfecto y tanto mayores son las fuerzas de rozamiento interno que surgen en él.

En la tabla 1.1 aparecen coeficientes de viscosidad para algunas sustancias a diferentes temperaturas.

Tabla 1.1

Líquidos	Coeficiente de viscosidad η (P)		
	$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$
Agua	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$0,29 \cdot 10^{-2}$
Mercurio	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Éter	$0,29 \cdot 10^{-2}$	$0,25 \cdot 10^{-2}$	
Glicerina	46	15	
Gases			
Hidrógeno	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$
Vapor de Agua	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-8}$
Aire	$1,71 \cdot 10^{-8}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$	$2,20 \cdot 10^{-8}$
Argón	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$2,21 \cdot 10^{-8}$	

¿Sabías que...?

Los cuerpos que caen en un fluido como el mar y en la atmósfera alcanzan una velocidad máxima o límite a partir de ese instante se mueven con MRU, debido a que las fuerzas en el sentido del movimiento están compensadas con las que se oponen a este (que generalmente son las que se representan en la figura 1.24). En el caso de un paracaidista, a partir de cierto momento cuando desciende se mueve con velocidad constante (MRU) y $\sum \vec{F} = \vec{0}$. El hombre ha estudiado el movimiento de los cuerpos en fluidos viscosos como el aire y ha analizado las formas que deben tener los cuerpos para moverse con mayor velocidad al desplazarse. A los cuerpos que están destinados a moverse por el interior de fluidos con velocidades relativamente altas se les confiere una forma especial que se denomina forma aerodinámica, en la naturaleza muchas aves y peces tienen dicha forma.

La ecuación vectorial para la fuerza de Stokes puede escribirse como:

$$\vec{F}_r = -6\pi\eta r\vec{v}$$

Esta ley se cumple para un fluido extenso, en caso contrario donde una esfera de radio r cae verticalmente a lo largo del eje de un cilindro de fluido de radio externo R y altura H donde $R > r$, Landenburg, Emersleben y Faxén obtuvieron que la fuerza de arrastre determinada por Stokes debe ser corregida como:

$$\vec{F}_s = -6\pi\eta\lambda r\vec{v}$$

donde λ viene dada por la ecuación
$$\lambda = \left[\frac{1 + 3,3\left(\frac{r}{H}\right)}{1 - 2,104\left(\frac{r}{R}\right) + 2,09\left(\frac{r}{H}\right)^3} \right]$$

¿Cuál de los valores del coeficiente de viscosidad será mayor, el calculado con la corrección o el calculado sin ella? ¿Qué precauciones se pueden tomar para hacer que el valor de la corrección sea despreciable?

Hora del laboratorio

Práctica de laboratorio 1.1

Medición del coeficiente de viscosidad

Objetivo:

- Medir el coeficiente de viscosidad del agua a temperatura ambiente mediante la aplicación de la fórmula de la Fuerza de Stokes.

Materiales:

- Un tubo plástico recto y transparente de aproximadamente 1 m de largo y 3 o más centímetros de diámetro interior (en caso necesario se puede usar un tubo de desecho de lámpara led transparente de 40 W equivalente), cerrado por un extremo. Cuidado con los tubos fluorescentes, dado que son muy frágiles y el polvillo blanco que cubre las paredes es tóxico.
- Regla (u otro instrumento) graduado en milímetros.
- Un litro de agua común.
- Un pequeño recipiente cilíndrico de plástico de un diámetro exterior inferior al del tubo, al que se le ata una cuerda, para poder recuperar los cuerpos con más facilidad).
- Diez cuerpos esféricos de vidrio, metal, o plásticos iguales cuya densidad supere a la del agua cuatro o más veces (en caso necesario pueden obtenerse de una caja de bolas o de bicicleta (o ser bolas sueltas), pueden ser chinatas, cuentas esféricas de un viejo collar, etcétera.)
- Un soporte que permita mantener el tubo con agua en posición vertical.
- Un teléfono celular.
- Una balanza con apreciación de 0,1 g (o menor)
- Sería bueno disponer de una computadora con un analizador de video (Tracker pudiera ser) instalado para procesar los datos, hacer el informe, etcétera.

Descripción y tareas:

La Ley de Stokes plantea que cuando un cuerpo esférico se mueve por el interior de un fluido sobre él actúa una fuerza de resistencia al movimiento que es proporcional a la rapidez con la que se mueve el cuerpo y al radio de dicho cuerpo. Se conoce además que el valor de dicha fuerza se puede determinar por la ecuación:

$$F_s = 6\pi\eta r v$$

En la expresión anterior F_s es el valor de la fuerza de Stokes, r es el radio del cuerpo esférico, v la rapidez con que se mueve el cuerpo con respecto al fluido (agua en nuestro caso) y η representa al coeficiente de viscosidad. Si de esta fórmula se despeja a η se obtiene que:

$$\eta = \frac{F_s}{6\pi r v}$$

¿Qué magnitudes será necesario medir para determinar el coeficiente de viscosidad del agua? Es evidente que se necesita medir F_s , r y v .

El radio de los cuerpos esféricos se puede medir con un pie de rey, un micrómetro o simplemente con la regla, desde luego que las mediciones con estos instrumentos tendrán incertidumbres diferentes las cuales deben ser evaluadas (se necesitan 10 cuerpos esféricos iguales para medir los 10 radios y luego determinar el valor medio, que es el valor de r que se usará)

La F_s y la v hay que medirlas utilizando la instalación experimental

Al hacer un análisis del cuerpo esférico que cae a través del líquido se advierte que sobre el mismo actúan tres fuerzas, la fuerza de gravedad, la fuerza de empuje y la fuerza de Stokes (figura 1.25)

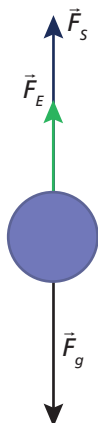


Fig. 1.25 Fuerzas que actúan sobre el cuerpo mientras cae

El valor de la fuerza resultante sobre el cuerpo es: $F_R = F_s + F_E - F_G$

Como se sabe: $F_s = 6\pi\eta rv$ $F_G = mg = \rho Vg$ $F_E = \rho_1 Vg$

Donde m es la masa del cuerpo esférico, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, ρ la densidad del material de que está hecho el cuerpo esférico, V el volumen del cuerpo esférico, ρ_1 la densidad del líquido, v la rapidez con la cual desciende el cuerpo. Entonces:

$$F_R = 6\pi\eta rv + \rho_1 Vg - mg$$

Para medir la fuerza de Stokes se emplean los valores de los parámetros en la condición de que el cuerpo baje con MRU o sea con velocidad

constante la cual se mide en el experimento. La condición de MRU se logra cuando F_R sea igual a cero, por tanto

$$6\pi\eta rv + r_1 Vg - mg = 0$$

De donde: $\eta = \frac{mg - \rho_1 Vg}{6\pi rv}$ será la ecuación de trabajo.

Esta es la ecuación que se empleará para determinar el coeficiente de viscosidad, pero antes es necesario hacer las mediciones de m , V , r y v .

m se puede medir con una balanza apropiada, r con un pie de rey, un micrómetro, o con la regla, V se puede calcular con el valor de r ya que es el volumen de cada cuerpo esférico y v se determina con los datos que se obtienen del experimento.

- 1) Monta la instalación experimental, tal y como se muestra en la figura 1.26. Es importante hacer una marca en el tubo a distancias de 10 cm a partir del extremo inferior, las marcas se pueden hacer con tinta por la parte exterior o colocar anillos de hilo, alambre bien fino o bandas elásticas finas alrededor del tubo cada 10 cm.

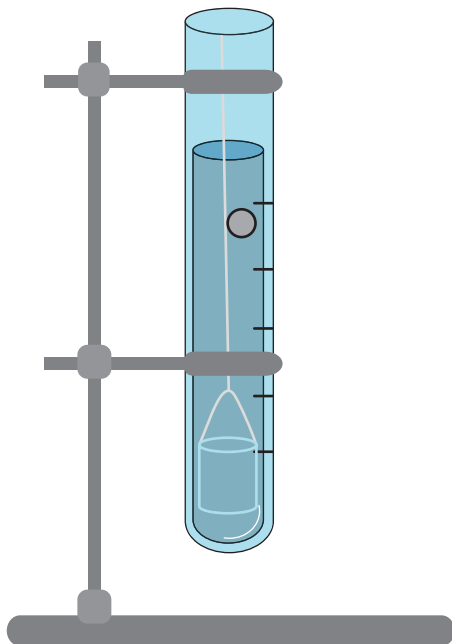


Fig. 1.26

- 2) Realiza las mediciones de los parámetros indicados. Para medir la masa de los cuerpos se puede medir la masa de los 10 cuerpos juntos y luego dividirla entre 10, es como si se determinara el valor medio midiéndolas una a una. Para medir el radio se puede medir cada cuerpo de forma individual con el pie de rey o el micrómetro y luego calcular el promedio que es el valor que debe tomarse para la determinación del coeficiente de viscosidad. Si se va a medir con la regla se colocan los diez cuerpos en una fila en contacto unos con otros, se mide la longitud de la fila y ese valor se divide entre 10 y se tiene el valor medio del radio. Anotar en el cuaderno los valores de todas las mediciones con claridad y con su correspondiente incertidumbre.
 - 3) Vierte agua en el tubo hasta una altura de 90 cm.
 - 4) Deja caer uno de los cuerpos desde la misma superficie del líquido lo más cercano posible al eje del tubo. Repetir esta acción 3 o 4 veces y observa atentamente el movimiento del cuerpo en su caída. Describe el movimiento.
 - 5) Extrae del tubo los cuerpos que se dejaron caer en la operación anterior.
 - 6) Prepara el teléfono celular como cronómetro y disponte a medir los intervalos de tiempo que demora el cuerpo en caer, cada 10 cm
 - 7) Deja caer los cuerpos esféricos como en la acción 4, 7 u 8 veces (hacer 7 u 8 ensayos de la medición) y medir los intervalos de tiempo que demora el cuerpo en recorrer cada 10 cm (al pasar de una, a la próxima marca en el tubo). Se recomienda que el experimentador que manipula el teléfono (cronómetro) sea el mismo que deja caer el cuerpo, el cual debe presionar la pantalla del teléfono cada vez que vea que el cuerpo cruza frente a una de las marcas (la atención visual debe estar puesta en el cuerpo que cae, el teléfono debe estar descansando sobre la mesa, con un dedo puesto encima del lugar donde se debe presionar para fijar el valor del tiempo transcurrido entre marca y marca. (con otro celular se pueden grabar los videos de los cuerpos cayendo, hacerlo desde una posición tal que la visual quede perpendicular al tubo).
- Con las mediciones hechas se debe confeccionar una tabla como la siguiente:

Tabla 1.2

No. de ensayo	Distancia recorrida (m)	Tiempo empleado (s)										Promedio del tiempo para cada distancia
		No. de ensayo										
		1	2	3	4	5	6	7	8			
1	0,1											
2	0,2											
3	0,3											
4	0,4											
5	0,5											
6	0,6											
7	0,7											
8	0,8											

- 8) Con los datos de la tabla construye una gráfica de distancia en función del tiempo. Toma los valores medios de tiempo para cada distancia (hacer la tabla y construir la gráfica en una hoja de cálculo de Excel u otro tipo de hoja de cálculo). En su defecto usar papel milimetrado.
- 9) De la curva representada en la gráfica selecciona el tramo más recto y calcula su pendiente ¿Qué magnitud física representa la pendiente?
- 10) Calcula el coeficiente de viscosidad del agua a temperatura ambiente mediante la ecuación de trabajo.
- 11) Redacta el informe de los resultados del experimento.

Tareas generales del capítulo

1. Sobre la base de la ecuación de Bernoulli explica los dos experimentos presentados al inicio del capítulo.
2. Si se hace una observación minuciosa se puede detectar que al viajar en un auto que se mueve con movimiento rectilíneo el aire sale por las ventanillas delanteras y entra por la parte trasera cuando el vidrio está roto. ¿Qué explicación física darías a este fenómeno?
3. Un tubo horizontal tiene en cierta región un área de 20 cm^2 siendo en la misma la velocidad del agua de 60 cm/s y la presión estática igual a la atmosférica. Si en cierta sección del tubo el área se reduce a 10 cm^2 , ¿cuál es en esta sección la velocidad del agua y el valor de la presión estática?

4. La boquilla de un soplete tiene un diámetro de 5,2 mm y gasta $0,052 \text{ m}^3$ de gas por minuto, ¿con qué velocidad sale el aire por la boquilla? ¿Cuáles consideraciones tuviste que hacer para responder la pregunta?
5. Por una tubería horizontal de sección circular fluye a régimen laminar y estacionario un fluido que tiene una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$. En determinada sección la velocidad del fluido es de $2,0 \text{ m/s}$ y el radio de la tubería es de 10 cm. Determina el radio de la tubería por donde el fluido pasará a 50 cm/s y la presión estática en la primera sección si en la segunda es de 180 cm de Hg.
6. Por un tubo de sección uniforme circula agua que fluye a régimen estable. Su inclinación respecto a la horizontal es de 30° y la velocidad del agua en un punto situado a 10 m de altura es de 12 m/s y la presión estática es de $1,2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$. ¿Cuál es la velocidad del agua en un punto situado a 8,0 m por debajo del anterior y cuál es el valor de la presión en dicho punto?
7. Se tiene un tubo inclinado de sección uniforme, por el que fluye agua. La presión estática, en un punto situado a 10 m del suelo excede a la presión de otro situado más alto en $2,0 \text{ N/m}^2$. ¿A qué altura está este segundo punto?
8. ¿Cuál es la diferencia de presión estática entre dos puntos de una tubería inclinada de sección uniforme por la que fluye a régimen laminar y estacionario un líquido incompresible cuya densidad es de $0,8 \text{ g/cm}^3$, si el desnivel entre dichos puntos es de 6,0 m?
9. Se reduce uniformemente el diámetro de una tubería horizontal de 8 cm a 3 cm. La velocidad en la sección mayor es de $2,0 \text{ m/s}$. Halla la diferencia de presiones estáticas del líquido entre una sección y la otra, suponiendo que el fluido es agua.
10. Una tubería horizontal que conduce agua, aumenta su sección transversal de 10 cm^2 a 30 cm^2 , la diferencia de presión estática entre las dos secciones es de 10^4 N/m^2 . Halla la velocidad del agua en cada sección y el gasto.
11. Por una tubería con un área de sección transversal de $4,2 \text{ cm}^2$ circula agua a una velocidad de $5,18 \text{ m/s}$. El agua desciende gradualmente 9,66 m mientras que el área del tubo aumenta en $7,6 \text{ cm}^2$.
 - a. ¿Cuál es la velocidad del fluido en el nivel inferior?
 - b. La presión estática en el nivel superior es de 152 kPa, halla la presión en el nivel inferior.

- 12.** La Defensa Civil Cubana advierte que la temporada ciclónica para nuestro país es del 1 de junio al 30 de noviembre. Durante una tormenta tropical está soplando aire ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$) sobre el tejado de una casa a una velocidad de 100 km/h.
- Calcula la diferencia de presión que tiende a levantar el tejado.
 - Halla la fuerza que se ejerce hacia arriba por parte del aire sobre una teja metálica si tiene un área de $4,0 \text{ m}^2$.
- 13.** Un aeroplano tiene un área total de sus alas de 25 m^2 , a cierta velocidad el aire fluye por la parte superior del ala a $49,8 \text{ m/s}$ y por la parte inferior del ala a $38,2 \text{ m/s}$. Si la densidad del aire es de $1,17 \text{ kg/m}^3$, halla la masa del aeroplano que puede ser sostenida solamente por el aporte que el aire hace a la fuerza de sustentación debido a la diferencia de velocidades del mismo por encima y por debajo de las alas.
- 14.** Toma una pelota de ping pong o una pelota de un tubo de desodorante (debe ser ligera), figura 1.27, y colócala sobre una tubería, cuyo diámetro sea similar al de la pelota (algo mayor o algo menor) por donde sale aire de forma vertical hacia arriba (puede ser el aireador del riel de aire). Explica basado en la ecuación de Bernoulli lo que se observa.

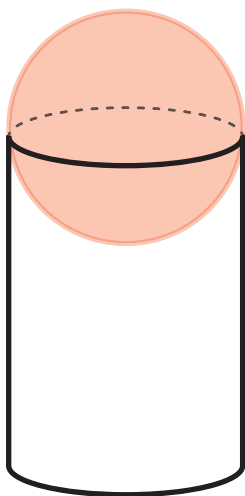


Fig. 1.27 Tubo, por donde sale aire hacia arriba, con pelota

- 15.** Recorta un pedazo de cartulina que cubra la parte más ancha de un embudo (figura 1.28), coloca el embudo de forma tal que el papel quede en la parte superior. Sopla fuertemente por la parte estrecha

del embudo tratando de sacar el papel de su posición. Explica por qué el papel no se desprende de la parte ancha del embudo.

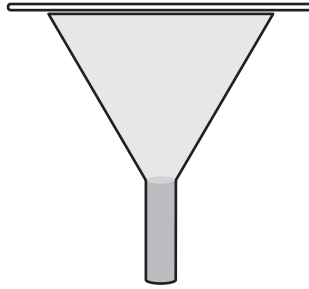


Fig. 1.28 Embudo con papel encima. Soplar hacia arriba por la parte más fina con poca intensidad al principio e irla aumentando progresivamente



CAPÍTULO 2

Fundamentos de la teoría cinético-molecular de los gases y de la termodinámica

¿Qué modelo permite describir el comportamiento de los gases? ¿Cómo se explica la presión ejercida por los gases? ¿Qué relación existe entre la temperatura y el movimiento de las moléculas de un gas? ¿Qué escalas se utilizan para medir la temperatura? ¿Qué ecuación caracteriza el estado de un gas? ¿Cómo describir los diferentes procesos que experimentan los gases y qué leyes cumplen? ¿Qué es la termodinámica y qué relación tiene con la teoría cinético-molecular? ¿Cuáles son las leyes fundamentales de la termodinámica?

Este tema está dirigido a consolidar y profundizar los conocimientos que ya tenemos sobre algunas de estas interrogantes y, sobre esta base, comenzar el estudio de las leyes que permiten describir el comportamiento de los gases (figura 2.1) y de las leyes de la termodinámica.

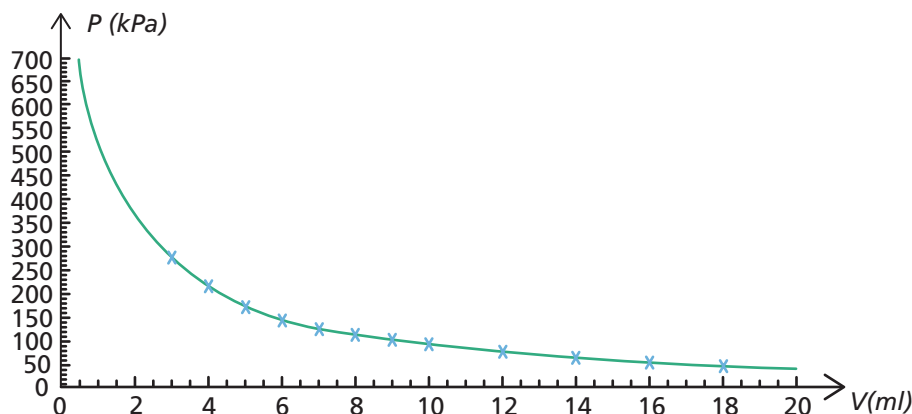


Fig. 2.1 Un ejemplo experimental del comportamiento de los gases. Gráfica de la variación de la presión de un gas con el volumen a temperatura constante.

¿Qué ecuación permite describir este comportamiento de los gases?

2.1 Modelo del gas ideal

En diferentes ramas de la ciencia y la tecnología es esencial el empleo de modelos a escalas reducidas como es el caso, por ejemplo, de los aviones, barcos, automóviles, naves espaciales instalaciones para el estudio de componentes y procesos eléctricos y electrónicos. También mediante computadoras se modelan procesos mecánicos, térmicos, electromagnéticos, nucleares, climatológicos, industriales y muchos otros.

Por supuesto, para el estudio de múltiples fenómenos físicos también se requiere de la utilización de modelos, incluyendo los de carácter matemático. Por ejemplo, ya nos hemos familiarizado con modelos como: cuerpo puntual, cuerpo rígido, oscilador armónico, carga puntual y muchos otros.

Ahora nos introduciremos en el estudio de otro importante modelo: el del “gas ideal”.

Ya conocemos que todos los cuerpos, en cualquiera de sus estados de agregación están constituidos por átomos en constante movimiento, repeliéndose o atrayéndose entre sí, en dependencia de la distancia que los separa. Esta es la idea esencial de la llamada teoría cinético-molecular de la sustancia.

Puede ser conveniente recordar que los cuerpos pueden estar formados no solo por átomos, sino también por agrupaciones de átomos, es decir por moléculas o por iones (átomos o moléculas cargados eléctricamente).

En el caso de los gases, caracterizar su estado en un momento dado (es decir, poder determinar las magnitudes que lo caracterizan y sus posibles variaciones en el transcurso del tiempo) resulta demasiado complejo mediante las leyes de la mecánica newtoniana aplicada a cada una de las partículas del gas pues en un litro de gas a la temperatura y presión estándar la cantidad de moléculas es del orden de $3,0 \cdot 10^{22}$ moléculas. Para vencer este inconveniente, el estado de un gas se puede caracterizar a partir de su presión, volumen y temperatura, magnitudes que son medibles con relativa sencillez y facilidad.

La descripción mediante estas magnitudes se nombra **descripción macroscópica del sistema**. Como el valor de estas magnitudes está determinado por el valor de las propiedades individuales de un gran número de moléculas, que no tienen el mismo valor, se hace un enfoque de promedios, sobre la base de un modelo llamado **modelo del gas ideal**. Para “construir” el modelo del gas ideal, de manera que describa lo mejor posible los gases

reales, a partir de las ideas de la teoría cinético-molecular de la sustancia, se establecen los postulados siguientes:

- 1. El gas está constituido por partículas llamadas moléculas que están en movimiento caótico.**

La palabra "gas" procede de la palabra griega "caos" que significa desorden. El movimiento de las moléculas tiene una amplia gama de velocidades en las tres dimensiones espaciales. En dependencia del gas, cada molécula está constituida por uno o varios átomos. Si el gas es un elemento simple o un compuesto estable, todas las moléculas son iguales. El gas también puede estar formado por iones.

- 2. El movimiento de las moléculas de un gas cumple con las leyes de la mecánica de Newton, de la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento lineal.**

Si bien una de las limitaciones de las leyes de Newton es la de su aplicación en los fenómenos del micromundo, es posible usarlas para describir el comportamiento de los gases con una buena aproximación.

- 3. El número total de moléculas es grande.**

Los continuos choques entre moléculas o con las paredes del recipiente provocan cambios de velocidad en magnitud y dirección. El gran número de choques hace que se muevan en zigzag y ello propicia la distribución del conjunto de velocidades.

- 4. El volumen de las moléculas es una fracción despreciable del volumen ocupado por el gas.**

La facilidad con que se comprime un gas demuestra que las moléculas ocupan un volumen muy pequeño. Esto se aprecia mucho mejor si el gas se condensa, ya que el líquido obtenido ocupa un volumen miles de veces menor. En condiciones de temperatura y presión estándar, cada molécula de oxígeno o nitrógeno del aire (sus principales componentes) que tienen una dimensión media de $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ están separadas distancias que son unas 10 veces mayor, por lo que cada una dispone de un volumen que es aproximadamente, 1 000 veces mayor que el de la misma molécula.

- 5. Ninguna fuerza apreciable actúa sobre las moléculas, excepto durante una colisión.**

Esta consideración se justifica si se recuerda que las fuerzas moleculares son de corto alcance. El que no existan otras fuerzas permite a

*las moléculas mantener un movimiento con velocidad constante entre choques. A la distancia recorrida sin interactuar se le llama **recorrido libre medio**. Por ejemplo, en condiciones de temperatura y presión estándar este recorrido es de $11 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ para las moléculas de hidrógeno y $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ para las de oxígeno. Estas distancias son muy pequeñas, pero al compararlas con las dimensiones moleculares equivalen a que una bola de billar tenga 10 m de recorrido libre medio.*

6. Los choques de las moléculas son perfectamente elásticos.

Esto significa que durante el choque se conserva la cantidad de movimiento lineal y la energía cinética.

Para que los gases reales cumplan con buena aproximación las condiciones de este modelo deben encontrarse a baja presión y elevada temperatura. A estos efectos, entiéndase por bajas presiones aquellas que no sobrepasen las 25 atm y por temperaturas elevadas, a valores distantes del cero absoluto de la escala Kelvin, que pueden corresponder a varios grados bajo cero de la escala Celsius.

Como se puede apreciar los gases reales en la mayoría de los procesos de la vida cotidiana, pueden ser considerados como ideales en un amplio rango de presiones y temperaturas con un error en los cálculos teóricos que no supera el 3 %.

Comprueba tus conocimientos

1. ¿Cuáles son los postulados en los que se fundamenta el modelo del gas ideal?
2. ¿Bajo qué condiciones un gas real se puede tratar como ideal?

2.2 Movimiento browniano

Al mezclar una gota de acuarela con agua, por todo el volumen de esta se distribuyen pequeñísimas partículas de la pintura (figura 2.2). Si observamos la mezcla con ayuda de un microscopio, advertiremos que las partículas con dimensiones menores de 0,001 mm se encuentran en constante movimiento desordenado. Algo similar ocurre al observar, también mediante un microscopio, partículas de ese tamaño que forman parte del humo.

Tales partículas y el movimiento que realizan se denominan **brownianos**, en honor al botánico británico Robert Brown, quien fue el primero en

advertir este sorprendente hecho cuando en 1827 observó que diminutas partículas del polen de una flor, suspendidas sobre la superficie del agua, se movían de modo permanente y errático.

Inicialmente se supuso que dicho movimiento era originado por ciertos microorganismos, pero esta idea tuvo que ser desechada. Entonces, se supuso que era producido por determinadas corrientes en el líquido, pero esta explicación tampoco fue satisfactoria.



Fig. 2.2 Difusión de un tinte de acuarela en agua

En síntesis, las variadas y complejas explicaciones que se intentaron dar a este fenómeno, sin tomar en consideración la existencia de las moléculas y su movimiento constante, no tuvieron éxito.

No fue hasta 1905 que Einstein dio explicación al movimiento browniano (en 1906 el físico polaco Smolujouski lo hizo de manera independiente) sobre la base de la existencia de las moléculas y su movimiento desordenado, que le permite golpear a la partícula browniana desde todas las direcciones. Por intervenir tantas moléculas de muy pequeño tamaño la cantidad de golpes en una dirección es superior en determinado momento, apareciendo una fuerza resultante que desplaza a la partícula browniana. Inmediatamente después el mayor número de choques proviene de otra dirección por lo que se modifica la dirección del movimiento. Estas fluctuaciones en el número de choques provocan el movimiento errático de la partícula browniana como se observa en la figura 2.3.

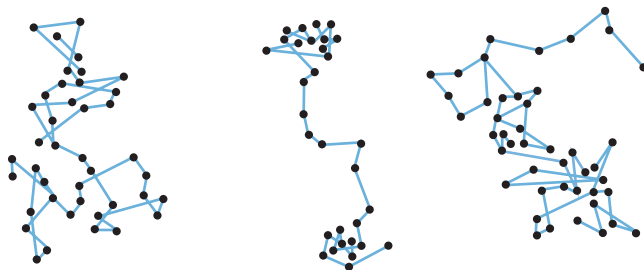


Fig. 2.3 Movimiento caótico de las partículas brownianas

Para que una partícula se comporte como browniana sus dimensiones deben estar entre los 10^{-4} cm y 10^{-5} cm. Cuando las dimensiones de las partículas no son tan pequeñas, las fluctuaciones en el número de choques de las moléculas no ocurren y las fuerzas actuantes se compensan, razón por la cual en tales partículas no se evidencia el movimiento browniano.

Al intervenir un número considerable de moléculas que golpean a la partícula grande, estamos en presencia de un fenómeno estadístico donde la probabilidad de golpes en todas direcciones es la misma y las fuerzas estarán compensadas. Si las partículas tienen pequeñas dimensiones disminuye considerablemente el número de choques y se manifiesta mejor la fluctuación o desviación del valor medio al tomar una pequeña muestra de un fenómeno estadístico. Esa es la razón por la cual sobre las partículas consideradas como brownianas no se compensan las fuerzas provocadas por los choques moleculares, a la vez que se producen cambios continuos en la dirección de dicha fuerza.

¿Sabías que...?

El movimiento browniano también existe en los cuerpos macroscópicos, pero resulta demasiado pequeño para detectarlo dada la inercialidad de tales cuerpos. En pequeños instrumentos de medición, como una pequeña balanza, sus brazos experimentan movimiento browniano y ello impone límite a la precisión con lo que pueden compararse las masas de dos cuerpos. En las transmisiones con ondas electromagnéticas se percibe una señal fluctuante al azar llamada ruido Johnson (en honor a su descubridor) que puede oírse con un radio receptor que no está sintonizado en una emisora. También en los elementos compuestos del emisor y del receptor se manifiesta el movimiento browniano que origina esta señal parásita.

Las partículas brownianas pueden ser consideradas como moléculas gigantes, que al interactuar con las moléculas que le rodean adquieren una energía cinética de valor igual a la de las moléculas, pero que al tener una masa mucho mayor su velocidad es considerablemente menor.

Las ecuaciones obtenidas por Einstein y Smolujouski fueron confirmadas en 1908 por los experimentos de Jean Baptiste Perrin (1870-1942), físico francés; y ello fue la prueba de la existencia de las moléculas y su movimiento caótico.

Gracias al movimiento constante de los átomos y moléculas, las sustancias pueden mezclarse entre sí *espontáneamente*, como conoces este hecho se denomina **difusión** (figura 2.2).

¿Sabías que...?

La difusión puede ocurrir entre líquidos, gases, sólidos y también entre estos. Ella tiene excepcional importancia en el mundo que nos rodea y para los organismos vivos. Así, como sabes, cerca de la superficie de la Tierra la atmósfera es una mezcla de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y otros gases, pero si no fuera por la difusión, dichos gases estarían distribuidos en zonas situadas a diferentes alturas, de acuerdo con su mayor o menor densidad. En la zona inferior, donde nos encontramos, estaría el gas más denso, el dióxido de carbono, con lo cual sería imposible la respiración. Por otra parte, cuando respiramos, el intercambio de oxígeno y de dióxido de carbono en nuestros pulmones se realiza por difusión a través de ininidad de vasos capilares. Sin la difusión, los gases no se disolverían en los líquidos y, en consecuencia, los peces no podrían respirar; sería imposible la elaboración de dispositivos semiconductores y, por tanto, no contaríamos con muchos de los equipos electrónicos que hoy utilizamos; etc. En resumen, sin el movimiento constante de los átomos y moléculas y la difusión que él origina, el mundo sería muy diferente.

La experiencia muestra que cuando la temperatura es más elevada, la mezcla de dos sustancias ocurre con mayor rapidez. Así, la sal o el azúcar se disuelven más rápidamente en agua caliente que en agua fría; para la difusión de ciertos átomos en los materiales semiconductores se emplean hornos a elevadas temperaturas. Estos y otros muchos hechos indican que la temperatura de los cuerpos y la velocidad del movimiento de sus átomos y moléculas se relacionan estrechamente. Es por eso que a dicho movimiento se le llama movimiento **térmico**. Al descender la temperatura, disminuye el movimiento térmico, sin embargo, él no cesa ni aún a las temperaturas más bajas.

Recuerda que...

Algunos aspectos, que sabemos de los cursos anteriores de Física y Química, sobre la masa y el tamaño de las moléculas y que es importante tener presentes son los siguientes:

En primer lugar, que la masa (m) de las moléculas y átomos aislados es muy pequeña. Por ejemplo, en 1 g de agua hay $3,3 \cdot 10^{22}$ moléculas, por consiguiente, la masa de una molécula será: $m_{H_2O} \approx \frac{1}{3,3 \cdot 10^{22}} g \approx 3,0 \cdot 10^{-23} g$. Una masa de este mismo orden tiene las moléculas de otras sustancias exceptuando las enormes moléculas de las sustancias orgánicas.

Que, a diferencia de la masa, la cantidad de sustancia (n), en el sistema internacional de unidades, se define como una magnitud que es proporcional al número de entidades elementales presentes y se mide en moles.

También que la cantidad de moléculas (N) en un mol (o de cualquier otro tipo de entes elementales) está dada por la constante de Avogadro: $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol, de manera que la constante de proporcionalidad entre la cantidad de sustancia y el número de entes elementales es $\frac{1}{N_A}$.

Que la masa molar (μ) es la masa que tiene 1 mol de cualquier sustancia. De acuerdo con esta definición, la masa molar, es igual al producto de la masa de la molécula m_0 (varía en dependencia de la sustancia) por la constante de Avogadro N_A : $\mu = m_0 \cdot N_A$.

Como las dimensiones de las moléculas son tan pequeñas es muy elevado del número de ellas que en condiciones normales se hallan en determinado volumen. Por ejemplo, 1 cm^3 de agua el número de moléculas es de $3,34 \cdot 10^{22}$. Por ello no nos percatamos, en muchos casos, de la naturaleza discreta de las sustancia. Lord Kelvin dijo, que, si en la imaginación suponemos que una gota de agua tiene el tamaño del globo terráqueo, los átomos de hidrógeno de las moléculas del agua aparecerían como granos de trigo y los de oxígeno como pequeños melones. Mediante el trabajo de laboratorio nos familiarizaremos más en lo relacionado con el tamaño de las moléculas.

Comprueba tus conocimientos

2. Sobre el movimiento browniano: ¿A qué debe su nombre? ¿Por qué solo es observable en las llamadas partículas brownianas? ¿De cuáles magnitudes depende?
3. Explica la causa del movimiento constante y desordenado de las partículas “brownianas”.
4. Coloca una cucharadita de azúcar en el fondo de un vaso y luego añade agua con cuidado, tratando que no se mezcle con el azúcar. Coloca el vaso en algún lugar sin moverse. Explica lo que sucede al cabo de varias horas. ¿Llegarán moléculas de azúcar hasta la superficie del agua? ¿Cómo pudieras comprobarlo?
5. Esclarece en detalle la afirmación del texto acerca de que sin la difusión los peces no podrían respirar.

6. Indaga acerca de otros hechos que pongan de manifiesto la importancia de la difusión para la existencia de los seres vivos.
7. Diseña y lleva a cabo algún experimento el cual apoye la idea de que el movimiento de los átomos y moléculas que forman los cuerpos está relacionado con la temperatura de estos.
8. ¿A qué se denomina cantidad de sustancia? ¿Cuál es su unidad de medida? ¿Qué significa esta unidad?
9. ¿Qué significado tiene la constante de Avogadro? ¿Cuál es su valor?
10. ¿Qué relación existe entre la masa de un cuerpo y la cantidad de sustancia que esta contiene?
11. Comprueba que en 1 g de agua hay aproximadamente $3,34 \cdot 10^{22}$ moléculas y que la masa de una molécula de agua es $2,99 \cdot 10^{-23}$ g.

2.3 Cálculo de la presión ejercida por un gas sobre la base de la Teoría Cinético-Molecular

Obtener una ecuación para calcular la presión ejercida por un gas, a partir de magnitudes microscópicas, equivale a establecer **la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular para el gas ideal**.

Para deducir la ecuación que nos permita determinar el valor de la presión a partir de la teoría cinético-molecular, con un mayor grado de generalidad, calculemos primero la presión de un flujo de partículas de masa m , que a la velocidad v ejecutan choques elásticos perpendiculares a la superficie, de área S de una pared de masa mucho mayor que la de cada una de ellas. $\Delta l = v\Delta t$

La situación se ilustra en la figura 2.4.

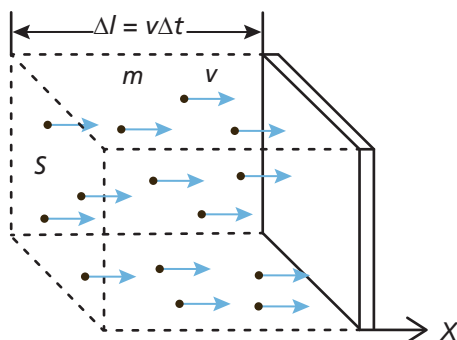


Fig. 2.4 Flujo de partículas golpeando una superficie

Si el flujo de partículas al chocar y rebotar ejerce una fuerza de valor F sobre la superficie de la pared del cubo, entonces, la presión sobre la pared se puede calcular mediante la fórmula:

$$P = \frac{F}{S}$$

Por la ley de acción y reacción la fuerza media que recibe la pared, en el tiempo Δt , es igual en módulo y de signo contrario a la que reciben las N partículas contenidas en el volumen $V = \Delta l S = v \Delta t S$ que impactan a la pared en el tiempo Δt . Si n_0 es el número de partículas por unidad de volumen (concentración), entonces:

$$N = n_0 V = n_0 \Delta l S = n_0 v \Delta t S$$

Por otra parte, el impulso externo $\vec{J}_{ext,x}$, para cada partícula que choca estará dado por:

$$\vec{J}_{ext,x} = \Delta \vec{p}_x$$

$J_{ext,x} = mv_x - mv_{0x}$ donde $mv_{0x} = v$ y $v_x = -v$ por ser un choque elástico, de donde se obtiene que:

$$J_{ext,x} = -mv - mv = -2mv$$

Si se toma en cuenta que $J_{ext,x} = F_{ext} \Delta t$, como todas las partículas se comportan igual, para las N moléculas que golpean la pared en el tiempo Δt se tendrá que:

$$F_{ext} \Delta t = -N 2mv, \text{ donde al sustituir } N \text{ queda}$$

$$F_{ext} \Delta t = -2n_0 v^2 \Delta t S m$$

De donde, dividiendo ambos miembros por Δt , se obtiene que:

$$F_{ext} = -2n_0 S m v^2 \text{ que es la fuerza media recibida por las } N \text{ moléculas.}$$

En virtud de la tercera ley de Newton, la fuerza que recibe la pared tiene igual módulo y signo positivo.

Finalmente, dividiendo por S , se obtiene

$$P = \frac{2n_0 S m v^2}{S}$$

$$P = 2n_0 m v^2$$

Esta es una ecuación general para calcular la presión de un flujo de partículas de gas, de líquido, de fotones, etcétera.

Si en lugar de un flujo de partículas, en el cubo de la figura 2.4 se encuentra un gas ideal, las moléculas golpean todas las paredes gracias a su

A partir de la figura 2.5 se puede demostrar que:

$$\overline{v_{R_{xy}}^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2}$$

$$\overline{v^2} = \overline{v_{R_{xy}}^2} + \overline{v_z^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

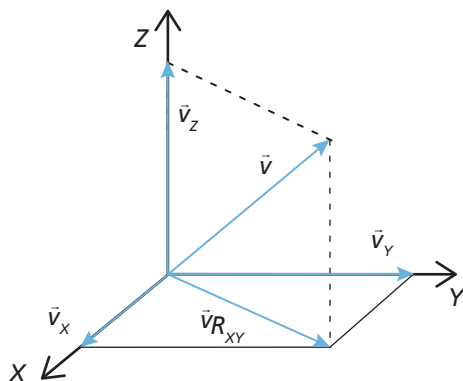


Fig. 2.5 Velocidades de las moléculas en las posibles direcciones

Comprueba tus conocimientos

- 13.** Escribe la ecuación fundamental de la Teoría Cinético-Molecular para el gas ideal.
 - a) ¿De qué magnitudes depende la presión?
 - b) Argumenta por qué la presión es directamente proporcional a n_0 y a $\bar{E}_c$.
- 14.** Se tiene un recipiente cerrado de paredes rígidas que contiene un gas a la temperatura T_1 .
 - a) ¿Por qué la presión del gas es igual sobre cada cm^2 de las paredes?
 - b) Al incidir los rayos del Sol sobre el recipiente ¿qué le sucede a la presión? ¿por qué?
- 15.** Un ciclista con poca experiencia toma la manguera del compresor y le introduce tanto aire al neumático que explota.
 - a) ¿Por qué explotó el neumático?
 - b) Al escuchar algunas quejas, en voz del ciclista, "el ponche-ro" le sugiere que mejore su cultura tecnológica y para ello le pide leer lo que dice en la superficie del neumático y la

- Calcula a cuantos pascales de presión equivale 1 lbf/in².
- ¿Cuántas libras fuerza por pulgada cuadrada (lbf/in²) lleva el neumático de una bicicleta si el fabricante recomienda 300 kPa como máximo?
- El ciclista reconoce que el neumático explotó cuando el manómetro marcó 60 lbf/in². ¿En cuánto sobrepasó a la presión máxima?
- Si el manómetro está graduado en kilogramo fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm²). ¿Qué valor en esta escala lleva el neumático cuya presión recomendada es 300 kPa?
- “El ponchero”, a modo de despedida, le comenta al ciclista que los neumáticos de automóviles llevan 30 lb de aire y los de bicicleta 40 lb. Al escuchar aquello el ciclista piensa que al recibir la masa de aire el primer neumático aumenta su masa en 30 lb y el segundo en 40 lb. Ayúdalo a comprender lo escuchado porque le parece ilógico.

Escala termodinámica de temperatura

La necesidad es la madre de la inventiva, dice un viejo proverbio. Fueron los médicos de la antigüedad los primeros que necesitaron medir la temperatura de los cuerpos, al ver que la salud del hombre se relaciona con esta magnitud física. Ello motivó a la fabricación de los primeros termómetros antes que se supiera lo que realmente se medía con ellos. Hoy día resulta imprescindible cuantificar dicha magnitud en procesos industriales, para dar el pronóstico del tiempo, conocer sobre el calentamiento global, etcétera.

Aunque la temperatura es una magnitud de uso cotidiano, es necesario darle un significado preciso para que tenga valor como unidad de medida en el campo de las ciencias. La noción dada por los órganos de nuestros sentidos es subjetiva y ello se evidencia si tocamos las diferentes partes de una silla construida de madera y metal, la segunda sustancia aparenta estar más fría que la primera, debido a que conduce mejor el calor proveniente de su mano y no porque tenga menor temperatura.

Recordemos algunos conocimientos que ya poseemos sobre esta magnitud física.

- Es una magnitud física escalar.
- Se mide con el termómetro.
- Depende de la velocidad del movimiento molecular.
- Los cuerpos en contacto, con diferentes temperaturas, intercambian energía hasta que se igualen las temperaturas, es decir hasta alcanzar el llamado equilibrio térmico. De hecho, esta es la principal propiedad de la temperatura.

Ahora trataremos de profundizar y precisar el concepto de temperatura atendiendo a la Teoría Cinético Molecular.

En la figura 2.6 se representan tres balones de volúmenes V_1 , V_2 y V_3 , que contienen diferentes masas de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, se han colocado en un recipiente que contiene una mezcla de agua con hielo a 0°C . Pasado un tiempo prudencial los tres gases tendrán la misma temperatura y los manómetros indicarán las presiones P_1 , P_2 y P_3 correspondiente a cada gas, que en las condiciones del experimento se comporta como ideal.

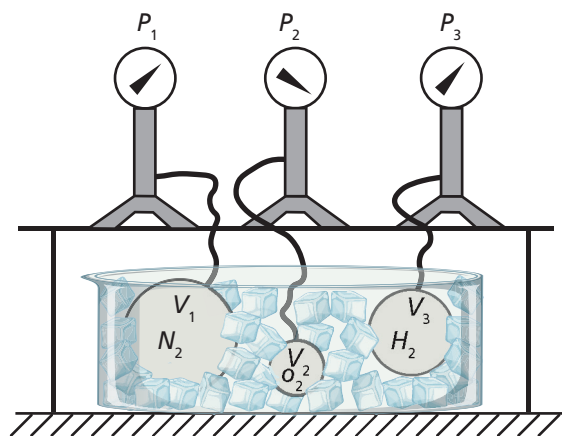


Fig. 2.6 Gases diferentes en naturaleza y volumen, en un sistema en equilibrio térmico

A partir de la ecuación 2.5 se puede obtener una relación entre la velocidad de las moléculas de un gas y su temperatura T :

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m} \quad 2.6$$

La constante $3k/m$ difiere para diferentes moléculas por tener distinta masa. Esto significa que a la misma temperatura T , las moléculas de menor masa tienen mayor $\overline{v^2}$.

El que $\overline{v^2}$ sea el valor medio del cuadrado de todas las velocidades pone de manifiesto la relación entre parámetros macroscópicos y microscópicos, así como el carácter estadístico de estos últimos.

Además, la temperatura solo tiene sentido para cuerpos macroscópicos al tomar el valor medio de la energía de todas las moléculas y no el de una sola. Carece de sentido hablar de la temperatura de una molécula, dado el carácter estadístico de esta magnitud.

La temperatura T usada en la ecuación 2.6 no puede tomar valores negativos porque la energía cinética es siempre positiva. Como veremos más adelante esta escala de temperatura es la llamada escala Kelvin.

Las velocidades medias de las moléculas toman elevados valores. Para temperaturas ordinarias como 27°C y 50°C se obtiene aproximadamente $1\,900\text{ m/s}$ y $2\,000\text{ m/s}$ para el hidrógeno. Al comparar estas velocidades con la segunda velocidad cósmica ($7\,900\text{ m/s}$) se explica la razón por la cual el planeta Tierra retiene su atmósfera mientras la Luna no puede hacerlo. Ello no prohíbe que determinadas moléculas de gas abandonen la Tierra al tener velocidades superiores al valor medio usado en los cálculos anteriores.

Escala termodinámica absoluta de temperatura

Precisemos primero que, para construir una escala de temperatura, lo primero es buscar dos fenómenos físicos, fáciles de reproducir y que ocurran siempre a la misma temperatura bajo iguales condiciones del medio solidario al sistema. Además, se requiere del cuerpo termométrico que, al variar su temperatura, se le modifique proporcionalmente la llamada magnitud termométrica. Como cuerpo termométrico puede ser usado un

sólido, un líquido o un gas y como magnitudes termométricas la longitud, el volumen, la presión, la resistencia eléctrica, etcétera.

La escala más usada en la mayoría de los países es la construida en 1742 por el astrónomo sueco Anders Celsius, que tomó como puntos fijos la temperatura de fusión del hielo y la de ebullición del agua, ambas a presión atmosférica normal. Como sustancia termométrica usó un líquido y como magnitud termométrica el volumen.

En los EE. UU. es muy usada la escala Fahrenheit, cuyo valor cero corresponde a una mezcla frigorífica de hielo, sal común y cloruro de amonio. A la fusión del hielo le puso el valor 32°F y a la ebullición del agua 212°F .

Al observar la escala de un termómetro se aprecia que a cada unidad de temperatura le corresponde igual longitud. Para que en esas condiciones las mediciones sean exactas se requiere que el coeficiente de dilatación volumétrica del líquido, usado como sustancia termométrica, se mantenga constante en el intervalo de temperaturas que se va a medir. Al no suceder de esa manera, los termómetros de líquido, como lo es el de mercurio, funcionan correctamente solo para ciertos intervalos de temperatura.

En los países muy fríos los termómetros de mercurio no operan correctamente porque esa sustancia se congela a -39°C cambiando considerablemente su coeficiente de dilatación. Resulta más adecuado usar alcohol que congela a -114°C .

Ante estos inconvenientes resulta necesario utilizar una sustancia termométrica cuyo coeficiente de dilatación sea constante en un amplio rango de temperaturas. Esta sustancia es el gas ideal o más exactamente, un gas real que se comporte como ideal, del que se puede tomar como magnitud termométrica la presión o el volumen (medibles con buena precisión).



De la historia

Anders Celsius (1701- 744) fue un físico y astrónomo sueco. Es conocido por idear una escala de temperatura centígrada, aunque diferente a la que se basa el sistema utilizado en la actualidad, pero que se denominó "Celsius" en su memoria. Físico y astrónomo sueco, creador de la escala termométrica que lleva su nombre. Anders Celsius fue una de las destacadas figuras del círculo de grandes científicos que introdujeron en Suecia las nuevas tendencias de las ciencias naturales, la investigación experimental y la visión newtoniana del mundo. Anders Celsius se instruyó sobre



todo en astronomía, pero, al igual que muchos otros científicos de la época, abarcó muchos otros campos.

Profesor de astronomía en la Universidad de Uppsala (1730-1744), supervisó la construcción del Observatorio de Uppsala, del que fue nombrado director en 1740. En 1733 publicó una colección de 316 observaciones de auroras boreales e intentó explicar la aurora boreal como un fenómeno atmosférico; aunque su explicación sería desechada, en su tiempo hizo época. En 1736 participó en una expedición a Laponia para medir un arco de meridiano terrestre, lo cual confirmó la teoría de Newton de que la Tierra se achataba en los polos. Falleció pocos años después de la construcción del Observatorio de Uppsala, con tan solo 42 años de edad, víctima de una tuberculosis aguda.

El grado Celsius (símbolo °C) reemplaza, desde 1948, a los grados centígrados en el Sistema Internacional de Unidades.

El grado Celsius pertenece al Sistema Internacional de Unidades, con carácter de unidad accesorio, a diferencia del kelvin, que es la unidad básica de temperatura en dicho sistema.

Por acuerdo internacional, entre 1954 y 2019 la unidad grado *Celsius* y la escala Celsius fueron definidas por cero absoluto y el punto triple del agua. A partir de 2007, se aclaró que esta definición se refería al agua oceánica media estandarizada de Viena (VSMOW por sus siglas en inglés), un estándar de agua definido con precisión. Esta definición también relacionó con precisión la escala Celsius con la escala del Kelvin, la unidad base del SI de la temperatura termodinámica con el símbolo K. El cero absoluto, la temperatura más baja posible, se define como exactamente 0 K y $-273,15^{\circ}\text{C}$. Hasta el 19 de mayo de 2019, la temperatura del punto triple del agua se definió exactamente como 273,16 K ($0,01^{\circ}\text{C}$).

Para un volumen de gas ideal constante, al variar la temperatura T la presión también lo hará en proporción directa (ecuación 2.4) y la razón P/T permanece constante.

$$\frac{PV}{N} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/unidad de } T$$

Sea P_1 la presión del gas ideal a la temperatura T_1 de fusión del hielo y P_2 la presión a la temperatura T_2 de ebullición del agua. Dividiendo este intervalo de temperatura en 100 unidades es posible calcular los valores de T_1 y T_2 en esta escala.

Experimentalmente se obtiene que:

$$\frac{P_2}{P_1} = 1,3661$$

Como $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$

2.7

Se tiene entonces que:

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,3661$$

Tomando $T_2 - T_1 = 100$, se obtiene que:

$$T_2 = T_1 + 100$$

De donde $\frac{T_1 + 100}{T_1} = 1,3661$

$$T_1 + 100 = 1,3661 T_1$$

$$100 = 0,3661 T_1$$

$$T_1 = 273,15$$

Sustituyendo T_1 en $T_2 = T_1 + 100$

$$T_2 = 373,15.$$

A esta escala se le llama escala termodinámica absoluta de temperatura y a su unidad Kelvin (K).

En la escala absoluta no existen temperaturas negativas, la temperatura cero en esta escala se nombra **cero absoluto**.

La figura 2.8 permite comparar las escalas de temperatura analizadas anteriormente.

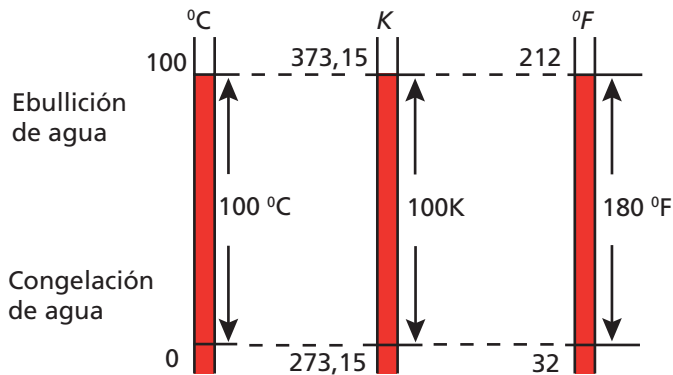


Fig. 2.8 Comparación de las diferentes escalas de temperatura

Como se puede observar en el mismo intervalo de temperatura que ocupan 100 $^{\circ}\text{C}$ existen 100 K y 180 $^{\circ}\text{F}$, de manera que 1 $^{\circ}\text{C}$ ocupa igual longitud en la escala que 1 K, mientras que 1 $^{\circ}\text{F}$ requiere menos longitud.

Para transformar temperaturas de una escala a la otra, se pueden obtener las fórmulas siguientes:

$$K = ^\circ C + 273,15 \quad 2.8$$

$$\frac{^\circ C}{5} = \frac{^\circ F - 32}{9}$$

$$^\circ F = \frac{9}{5} ^\circ C + 32 \quad 2.9$$

Nota que las fórmulas 2.8 y 2.9 se pueden obtener directamente de la comparación de las escalas representada en la figura 2.7. Hazlo.

La medición precisa de la temperatura es importante para la ciencia y la técnica. Los termómetros de gas son los más precisos, pero su calibración requiere largo tiempo de arduo trabajo, razón por la cual dichos instrumentos son usados para establecer ciertos puntos fijos de la llamada escala internacional de temperaturas. Estos puntos permiten la calibración de otros termómetros.

Comprueba tus conocimientos

- 16.** Escribe la relación matemática entre la temperatura y la velocidad media de las moléculas de un gas. Precisa el significado de cada término de la relación encontrada.
- 17.** Se tienen dos balones de igual volumen conectados entre sí por una llave. En uno de los balones se introducen 20 g de N_2 y en el otro 20 g de O_2 a igual temperatura y en condiciones de gas ideal.
 - a) ¿Qué balón tiene mayor número de moléculas? Llega a una ecuación que lo demuestre.
 - b) La energía cinética media de las moléculas de estos gases es igual o diferente. Argumenta. ¿Y la velocidad cuadrática media?
- 18.** ¿Qué parámetros microscópicos del gas se relacionan con la temperatura?
- 19.** ¿Qué significado físico tiene la relación PV/N ?
- 20.** ¿Qué significa la constante de Boltzmann?
- 21.** ¿Qué relación existe entre la temperatura medida en grados celsius y en kelvin?

2.5 Ecuación de estado del gas ideal

Sobre la base del modelo del gas ideal se obtuvo la ecuación que permite calcular la presión en función de la energía cinética media de las moléculas (2.1) y de la energía cinética media en función de la temperatura (2.5):

$$P = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_c$$

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

Sustituyendo 2.5 en 2.1 y que $n_0 = \frac{N}{V}$

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{3}{2} k \cdot T$$

Se obtiene que:

$$PV = NkT$$

Que puede ser expresada en función de la cantidad de sustancias (n) si se divide y multiplica el segundo miembro de la ecuación por el número de Avogadro N_A .

$$PV = \frac{N}{N_A} k N_A T$$

De donde se obtiene que:

$$PV = nRT \quad 2.10$$

Donde $R = k N_A$, es una constante llamada constante universal de los gases con valor:

$$R = 8.31 \text{ J/mol K}$$

R expresa el valor de energía necesaria para que 1 mol de moléculas de gas ideal cambie su temperatura en 1 K.

La ecuación 2.10 recibe el nombre de **ecuación de Clausius-Clapeyron** o **ecuación de estado para el gas ideal**. Esta ecuación establece la relación entre los parámetros macroscópicos que caracterizan al gas ideal en cada estado, es decir, una masa determinada de gas solo puede hallarse en aquellos estados que cumplan con la ecuación 2.10

En el caso particular de un proceso en que el gas pasa de un estado 1 a un estado 2 de manera que la cantidad de gas permanece constante, la ecuación 2.10 se puede escribir de la forma.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad 2.11$$

La ecuación de estado para el gas ideal puede aplicarse a gases reales cuando estos se encuentran a altas temperaturas y bajas presiones, aunque como sabemos, se obtienen resultados satisfactorios para los gases en condiciones “ordinarias”.

Esta concordancia entre los resultados prácticos y los previstos por la teoría cinético-molecular del gas ideal es una prueba más de la validez de este modelo.

Problema resuelto 2.1

Una bomba de aire para bicicleta expelle, en cada bombeo, un volumen de aire $V_0 = 40 \text{ cm}^3$. ¿Cuántos bombeos son necesarios para que la presión en una cámara de bicicleta de $2\,000 \text{ cm}^3$ sea igual a $1\,519,5 \text{ hPa}$? Considera que la presión atmosférica es de $1\,013 \text{ hPa}$ y desprecia el calentamiento del aire en la bomba.

Solución:

Bajo la consideración de que el aire en estas condiciones se comporta como un gas ideal, se tiene que:

$$PV = nRT$$

Entonces, el número de moles que se introducen en la cámara en cada bombeo será:

$$n = \frac{P_0 V_0}{RT}$$

Si llamamos J al número de bombeos, la cantidad de moles de gas introducidos en la cámara estará dada por J_n .

Como el aire en la cámara también cumple con la ecuación de estado se puede escribir que:

$$J_n = \frac{PV}{RT}$$

$$J \frac{P_0 V_0}{RT} = \frac{PV}{RT}$$

De donde se obtiene que:

$$J = \frac{PV}{P_0 V_0}$$

$$J = \frac{(1519,5 \text{ hPa})(2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}{(1013 \text{ hPa})(4,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3)}$$

$$J = 75 \text{ bombeos efectuados.}$$

Comprueba tus conocimientos

22. Escribe la ecuación de estado para un gas ideal y di qué significado tiene cada término.
23. Escribe la forma de la ecuación de estado para el caso particular de un proceso que pasa del estado A al estado B.

2.6 Leyes de los gases

Una masa de gas ideal constante, en equilibrio, posee iguales valores de presión y temperatura en cualquier parte del volumen que ocupa.

Semejante sistema puede ser sometido a procesos en los cuales cambie una o varias de las magnitudes que caracterizan su estado en un momento dado.

Por ejemplo, si un sistema se encuentra en un estado 1, la ecuación que caracteriza ese estado (si la masa no varía) se puede escribir como:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR$$

Al modificar algunas de las magnitudes del primer miembro, obligatoriamente debe cambiar otra, o las dos restantes.

Se nombran leyes de los gases a la descripción del comportamiento de su estado cuando cambian algunas de las magnitudes que caracterizan su estado (P_1 , V_1 , T_1) permaneciendo constante la otra.

A los procesos en que permanece constante una magnitud se le nombra en general isoprocesos. En particular, los isoprocesos se acostumbran a denominar:

Proceso isotérmico si la temperatura permanece constante durante el proceso.

Proceso isocórico o isovolumétrico si el volumen permanece constante durante el proceso.

Proceso isobárico si la presión permanece constante durante el proceso.

Analizaremos ahora estos procesos

Proceso isotérmico

La ecuación estado, $PV = nRT$ para un proceso en el que la temperatura permanezca constante y la cantidad de gas no cambie, se puede escribir como:

$$PV = \text{constante}$$

Es decir, en los procesos isotérmicos son posibles los estados en los que el producto de la presión por el volumen ocupado por el gas permanece

constante. Esto significa que si el gas se encuentra en un estado donde su volumen es V_1 , su presión P_1 y su temperatura T y pasa sin variar la temperatura a un estado con valores V_2 , P_2 , entonces se cumple que:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad 2.12$$

En la figura 2.9 se representa una familia de gráficas de la presión en función del volumen para dos temperaturas T_1 y T_2 . Cada una de esas curvas es una rama de hipérbola y se denomina isoterma. Si se traza una paralela al eje de las presiones que corte a las dos isotermas se puede apreciar que al mismo volumen corresponde una mayor presión en el caso de la isoterma a mayor temperatura.

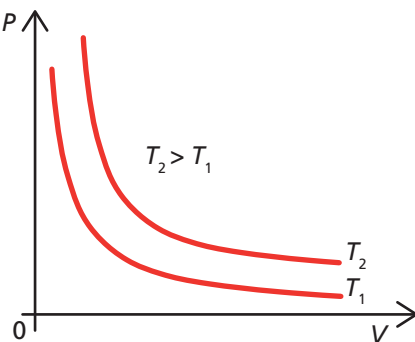


Fig. 2.9

En la figura 2.10 se representa un dispositivo que permite investigar experimentalmente esta dependencia.

Al dar vueltas a la manivela A se puede disminuir y aumentar el volumen. Si el proceso se ejecuta lentamente (se dice que "de forma cuasiestática") toda la masa de aire mantiene una presión uniforme y la temperatura permanece constante (las paredes metálicas permiten el intercambio de calor para que se mantenga el sistema en equilibrio térmico con el medio). Estamos entonces ante un proceso isotérmico, en que el gas va pasando por sucesivos estados de equilibrio que pueden ser representados en una gráfica como la de la figura 2.9.

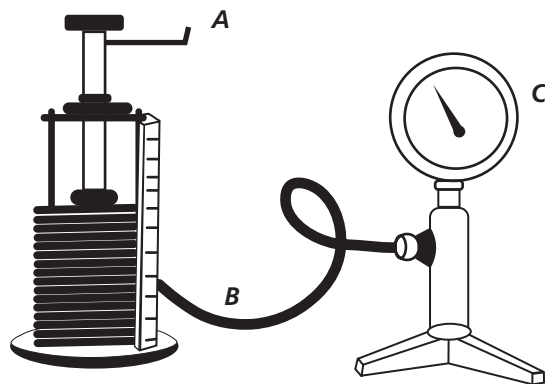


Fig. 2.10 El fuelle metálico de forma cilíndrica contiene cierta cantidad de aire a la presión atmosférica y la temperatura ambiente (condiciones con las que el aire se comporta como gas ideal). El manómetro C indica la presión

La ley $PV = \text{constante}$, fue descubierta empíricamente por el físico inglés Robert Boyle, en el siglo XIX y se conoce con el nombre de **Ley de Boyle-Mariotte**.

Problema resuelto 2.2

Se comprimen 100 cm^3 de gas a 0°C y presión normal ($1,01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$) hasta que su volumen se reduce a 20 cm^3 , permaneciendo constante la temperatura durante el proceso. ¿Cuál es la presión del gas en el estado final?

Solución:

Como el proceso se realiza a temperatura constante, bajo la hipótesis de que el gas se comporta como un gas ideal, se cumple que:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Dado que se conocen los valores de P_1 , V_1 y V_2 , basta con despejar P_2 en la ecuación anterior para poder resolver el problema.

Despejando P_2 y sustituyendo por los valores, expresados en sus unidades fundamentales, se obtiene que:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{(1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa})(10^{-4} \text{ m}^3)}{2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 5,05 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Proceso isobárico

En el caso de un proceso isobárico, si la cantidad de gas no varía, la ecuación $PV = nRT$, se puede escribir de la forma:

$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

Es decir, en los procesos isobáricos el volumen y la temperatura son directamente proporcionales, o lo que es lo mismo, el volumen varió linealmente con la temperatura.

Al pasar de un estado físico 1 a otro 2, mediante un proceso la temperatura y el volumen se relacionan como:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

2.13

Mediante un dispositivo como el de la figura 2.9 también se puede hacer el estudio experimental de este tipo de procesos, para ello se puede elevar (o disminuir) la temperatura del gas al colocar el fuelle metálico dentro de un líquido que se calienta (o enfría) y mediante la manivela se aumenta (o disminuye) el volumen de manera que se mantenga la presión constante.

En la gráfica de la figura 2.11 se representa el proceso mediante el cual un gas pasa del estado 1 al 2 mediante un proceso isobárico.

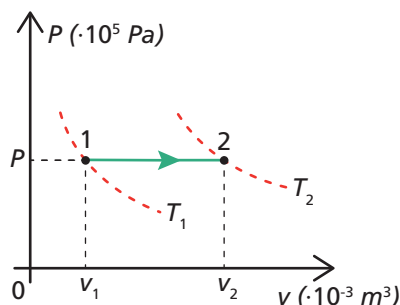


Fig. 2.11 Expansión isobárica. El sistema pasa del estado 1 al 2 a presión constante, en el proceso el volumen aumenta y la temperatura aumenta proporcionalmente.

En la vida diaria muchos de los sistemas en estudio son abiertos por lo que ocurren sometidos a la presión atmosférica, magnitud esta cuyas variaciones son relativamente lentas, haciendo que procesos de corta duración transcurran a presión constante. Las tablas de constante físicas se confeccionan a la presión atmosférica existente a nivel del mar que en buen tiempo toma el valor $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, llamada presión normal o estándar ambiente.

Problema resuelto 2.3

La temperatura de un gas aumenta de 10°C a 50°C , permaneciendo la presión constante durante el proceso. Si el volumen inicial ocupado por el gas fue de 100 cm^3 , calcula el volumen final.

Solución:

Si se considera que el gas se comporta como un gas ideal, se cumple en general que:

$$PV = nRT$$

Como en este caso el proceso se realiza a presión constante, se obtiene entonces que:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Dado que se conocen los valores de V_1 , T_1 y T_2 , basta con despejar V_2 en la ecuación anterior para poder resolver el problema.

Despejando V_2 y sustituyendo por los valores, expresados en sus unidades fundamentales, se obtiene que:

$$V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1}$$

$$V_2 = \frac{(50 + 273)\text{K}(10^{-4} \text{ m}^3)}{(10 + 273)\text{K}} = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Nota: en este caso, como lo que se tiene es un cociente entre las temperaturas no es necesario expresar la temperatura en kelvin, pero se ha hecho así para enfatizar la importancia que tiene, en general, expresar todos los valores en las unidades fundamentales.

Proceso isocórico

En el caso de un proceso isocórico, si la cantidad de gas no varía, la ecuación $PV = nRT$, se puede escribir de la forma:

$$\frac{P}{T} = \text{constante}$$

Es decir, en los procesos isocóricos la presión y la temperatura son directamente proporcionales, o lo que es lo mismo, la presión varía linealmente con la temperatura.

Al pasar de un estado físico 1 a otro 2, mediante un proceso isocórico la temperatura y la presión se relacionan como:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad 2.14$$

También se puede hacer el estudio experimental de este proceso con un dispositivo como el de la figura 2.10, para ello se puede elevar (o disminuir) la temperatura del gas al colocar el fuelle metálico dentro de un líquido que se calienta (o enfría) y observar como cambia la presión si el volumen permanece constante.

En la gráfica representada en la figura 2.12 se muestra el proceso mediante el cual un gas pasa del estado 1 al 2 mediante un proceso isocórico.

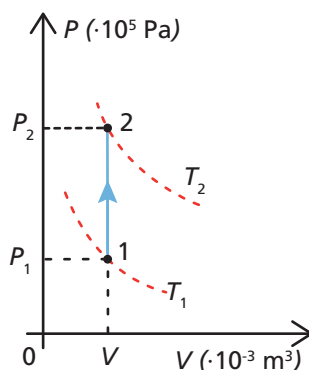


Fig. 2.12 Representación gráfica de un proceso de calentamiento isocórico

Este tipo de proceso es muy común en la vida diaria donde abundan ejemplos de gases contenidos en recipientes de paredes rígidas que modifican su presión al ser enfriados o calentados. Ambas modificaciones de la temperatura pueden ser perjudiciales cuando la diferencia de presiones entre el interior y exterior del recipiente, lleguen a romper sus paredes provocando explosiones o implosiones no deseadas.

Las leyes que describen los procesos isobáricos e isocóricos también fueron establecidas empíricamente en el siglo XIX y se con el nombre de leyes de Gay-Lusac.

Problema resuelto 2.4

La presión de un gas es de $2,02 \cdot 10^5$ Pa a 17°C . Si la presión se reduce a $5,05 \cdot 10^4$ Pa a volumen constante, ¿cuál es la temperatura final?

Solución:

Si se considera que el gas se comporta como un gas ideal, se cumple en general que:

$$PV = nRT$$

Como en este caso el proceso se realiza a volumen constante, se obtiene entonces que:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Dado que se conocen los valores de P_1 , P_2 y T_1 , basta con despejar T_2 en la ecuación anterior para poder resolver el problema.

Despejando T_2 y sustituyendo por los valores, expresados en sus unidades fundamentales, se obtiene que:

$$T_2 = \frac{P_2 V_1}{P_1}$$

$$T_2 = \frac{(5,05 \cdot 10^4 \text{ Pa})(17 + 273) \text{ K}}{2,02 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = 72,5 \text{ K}$$

Analicemos ahora otras dos importantes leyes de los gases.

Ley de Dalton

En un recipiente se encuentra encerrada cierta masa de oxígeno que ejerce presión sobre sus paredes. ¿Qué le sucede al valor de la presión si se le añade una masa de nitrógeno? La lógica indica que ahora sobre las paredes golpea un mayor número de moléculas provocando un incremento de la presión. Siguiendo este razonamiento se llega a la conclusión de que, al agregar otros gases, la presión se sigue incrementando. El químico inglés John Dalton estableció en forma empírica que la presión ejercida por una mezcla de gases encerrado en un recipiente de volumen V , es igual a la suma de las presiones que hace cada gas, si solo él ocupara el volumen V . A cada una de estas presiones se le llama presión parcial del gas.

$P_{\text{TOTAL}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$ donde P_1 , P_2 , P_3 , P_n son presiones parciales.

La teoría cinético-molecular explica este comportamiento basado en que, si la presión de la mezcla no es elevada, el conjunto de gases se comporta como un gas ideal cuya presión se debe al choque de las moléculas que constituye cada gas.

$$P_{\text{TOTAL}} = \frac{N_1 k T}{V} + \frac{N_2 k T}{V} + \frac{N_3 k T}{V} + \dots + \frac{N_n k T}{V} \quad 2.15$$

Para que lo anterior sea válido, los gases deben encontrarse en equilibrio químico (no existe reacción química) y equilibrio térmico.

La ley de Dalton encuentra múltiples aplicaciones en la vida diaria por ser abundante los ejemplos donde una mezcla de gases no reaccionantes coincide en un mismo volumen como es el caso del aire que compone

nuestra atmósfera (21 % de oxígeno, 78 % de nitrógeno, 1 % de argón y otros en pequeñas proporciones).

Ley de Avogadro

Como ya es conocido del curso de Química, los experimentos realizados a inicios del siglo XIX, referentes a las combinaciones químicas en los gases, demostraron que los volúmenes de los gases reaccionantes guardan entre sí relaciones definidas. Con estas evidencias, y después de continuos y sistemáticos experimentos, Amadeo Avogadro pudo formular, en 1811, la siguiente hipótesis:

A igual presión y en iguales condiciones de temperatura, un mole de cualquier gas ocupa un mismo volumen, cuyo valor es $V_0 = 0,002\,4\text{ m}^3$ (o 22,4 L).

Este enunciado es conocido como Ley de Avogadro.

La explicación de este hecho nos la ofrece la teoría cinético-molecular.

Como:

$$P = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_c \text{ y } \bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

Entonces:

$$P = n_0 kT$$

De esta ecuación se infiere que para iguales valores de presión y temperatura la concentración de moléculas por unidad de volumen es la misma.

$$n_0 = \frac{P}{kT} = \text{constante} = \frac{N}{V}$$



De la historia

La célebre memoria de Lorenzo Romano Amedeo Avogadro (1776–1856), que casi pasó inadvertida en su época, fue dada a conocer al mundo científico por Estanislao Cannizzaro, en el Congreso de químicos celebrado en Karlsruhe en 1860. Fue la base de la “reforma” de Cannizzaro, con la cual la ciencia pudo finalmente, después de medio siglo de tentativas, compromisos e incertidumbres (puede decirse que de crisis), adquirir un concepto y un método seguro para la determinación de los pesos atómicos y de las fórmulas de composición de las sustancias.

Problema resuelto 2.5

Calcula el número de moléculas contenidas en un volumen de $1,0\text{ cm}^3$ a una presión de 10^5 Pa y una temperatura de 300 K .

Solución:

Para calcular el número de moléculas (N) contenidas en un recipiente basta con multiplicar el número de moles (n) por el número de Avogadro (N_A). Por lo tanto:

$$N = nN_A \quad (1)$$

Por otra parte, el número de moles se puede calcular, en función de los datos dados en el problema, a partir de la ecuación de estado:

$$PV = nRT \quad (2)$$

Despejando n en esta ecuación y sustituyendo el resultado en (1):

$$N = \frac{PV}{RT} N_A$$

Sustituyendo por los valores numéricos:

$$N = \frac{(10^5 \text{ Pa})(10^{-6} \text{ m}^3)}{(8,31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(300 \text{ K})} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ moléculas}$$

Problema resuelto 2.6

La gráfica representada en la figura 2.13, muestra los procesos experimentados por una muestra de gas ideal monoatómico.

- Identifica los procesos y justifica tu respuesta.
- Explica el comportamiento del gas en cada uno de los procesos según la T. C. M.
- Calcula la temperatura del estado 3 si en el estado 2 es de 100 K.
- Calcula la presión del estado 1.
- Determina la cantidad de sustancia.

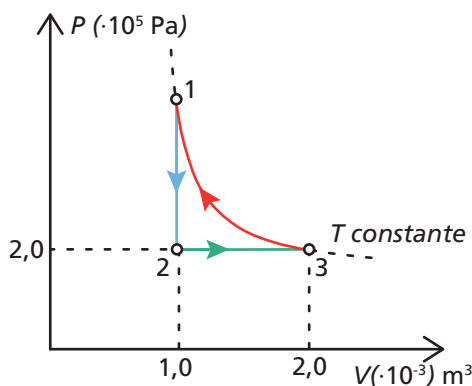


Fig. 2.13

Solución:

- a) Los procesos los identificas a partir del parámetro macroscópico que permanece constante, y caracterizas o los restantes, considerando las leyes de los gases correspondientes:
- 1-2 enfriamiento isocórico, la presión disminuye en la misma medida que disminuye la temperatura.
- 2-3 expansión o calentamiento isobárico, el volumen aumenta proporcionalmente a la temperatura.
- 3-1 compresión isotérmica, la presión aumenta en la misma medida que disminuye el volumen, son inversamente proporcionales.
- b) 1-2 La concentración del gas permanece constante, al disminuir la energía cinética media de las moléculas, disminuye el número efectivo de choques de las moléculas con las paredes del recipiente.
- 2-3 El número de choques efectivos de las moléculas del gas se mantiene constante, la concentración disminuye o aumentan los espacios intermoleculares, pero la energía cinética media de las moléculas aumenta por lo cual se mantiene la misma probabilidad de impactos con las paredes del recipiente.
- 3-1 aumenta la concentra molecular, la energía cinética media de las moléculas permanece constante, aumenta el número de choques efectivos.
- c) Para conocer uno de los parámetros de estados partimos de la ecuación de estado del gas ideal:

$$PV = nRT$$

Al no conocer la cantidad de sustancia de la muestra del gas tienes dos opciones, calcular para uno de los estados esta magnitud o comparar dos de los estados ya que el sistema es cerrado por lo que se mantiene la cantidad de sustancia.

$$\frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{P_3 \cdot V_3}{T_3}$$

$$T_3 = \frac{P_3 \cdot V_3 \cdot T_2}{P_2 \cdot V_2}$$

$$T_3 = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 100 \text{ K}}{1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$T_3 = 200 \text{ K}$$

Este resultado se obtiene aplicando la ley de los gases para presión constante, si el volumen se duplicó es porque la temperatura también se

duplicó, para este proceso el volumen es directamente proporcional a la temperatura.

Conocida la temperatura del estado 3 se puede aplicar la ley de Boyle para procesos a temperatura constante, si el volumen se redujo a la mitad la presión se duplicó, es decir, su valor es .

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{2,0 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,3 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 1,0 \cdot 10^2 \text{ K}}$$

$$n = 0,23 \text{ mol}$$

Comprueba tus conocimientos

24. ¿A qué se llama proceso isotérmico?
25. ¿Qué plantea la ley, de Boyle-Mariotte?
26. Representa gráficamente la ley de Boyle en un diagrama P - V .
27. ¿Qué es un proceso isobárico? ¿Cómo se relacionan los parámetros del estado en un proceso de este tipo? Representa este proceso en un diagrama P - V .
28. ¿Qué nombre reciben, los procesos de volumen constante? ¿Qué relación existe entre la presión y la temperatura en este proceso? ¿Cómo se representa este proceso en un diagrama P - V ?
29. Considera que a un tanque de metal se le inyecta aire mediante una bomba; el manómetro indica un aumento de 'presión. ¿Se cumplirá aquí la relación $P/T = \text{constante}$? Explica.
30. ¿Qué plantea la ley de Dalton?
31. ¿Qué significan los términos presión parcial y presión total?
32. ¿Qué plantea la ley de Avogadro? Interpreta el contenido de esta ley desde el punto de vista de la teoría cinético molecular.

Hora del laboratorio

Práctica de laboratorio 2.1 Estudio de la ley de Boyle-Mariotte

Objetivo. Estudiar experimentalmente la ley de Boyle-Mariotte en un gas real (el aire), que se encuentra bajo las condiciones de laboratorio.

Hipótesis. Si la masa y la temperatura del gas (aire) permanecen constantes, entonces en la medida que disminuye el volumen del gas aumenta linealmente la presión.

Instrumentos y materiales:

Sensor de presión del conjunto IDES.

Computadora.

Jeringuilla.

Técnica operatoria:

Enciende la computadora y comprueba que reconoce el sensor en el *software* IDES.

Abre el *software* del experimento y haz clic en el menú *Experiments-Thermology-Boyle's law*. Entra a la interface específica del experimento.

Toma la jeringuilla y conéctala al sensor. Coloca el pistón en un volumen inicial de 50 ml. Comprueba que tiene hermeticidad. Registra el valor en la casilla de volumen. Haz clic en el botón *Record*.

Empuja el pistón de la jeringuilla y reduce el volumen en 5 ml (hasta 45 ml). Registra el valor en la casilla del volumen y haga clic en el botón *Record*, registra la presión correspondiente por cada volumen.

Repetir el paso 4 para 40 ml, 35 ml, 30 ml, 25 ml. Recuerda hacer clic en el botón *Record* para cada volumen.

Haz clic en el botón *Plot* (parte izquierda inferior) para añadir gráficas. Asígnale al eje de las x el volumen y al eje y la presión. Haz clic en el botón *OK* y obtén la gráfica de P - V .

Observa y analiza la gráfica obtenida e interpreta la relación entre la presión y el volumen.

Desmonta el sensor y la jeringuilla. Guarda los utensilios en su maleta.

2.7 Introducción a la termodinámica

La palabra termodinámica proviene de las palabras griegas *terme* que significa calor y *dynamis* que significa trabajo. El comienzo de esta rama de la física guarda estrecha relación con la aparición de las máquinas térmicas, cuyo origen se remonta al siglo I de nuestra era con la llamada Bola de Eolo creada por Herón de Alejandría (figura 2.14) la cual rotaba al expulsar vapor. Este invento no pasó de ser una mera curiosidad sin ninguna aplicación práctica.

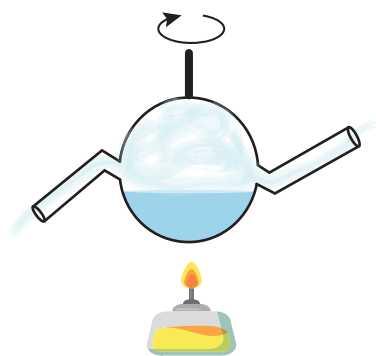


Fig. 2.14 Bola de Eolo

Con el perfeccionamiento hecho por el ingeniero escocés James Watt a la máquina de vapor en 1765 (se dice que fue su inventor debido a los importantes cambios que le introdujo) comienza la llamada Revolución Industrial. Estas máquinas demandaban grandes cantidades de energía obtenida tanto de la leña como del carbón mineral. Dichas máquinas fueron usadas en minas, textiles y otros procesos industriales.

Años después se extendió su uso al transporte al ser botado al agua el primer barco a vapor en 1807 y la primera locomotora en 1825.

Transcurre la segunda mitad del siglo XIX cuando aparece el motor de combustión interna que requería un combustible específico: el petróleo. Las posibilidades técnicas de esta nueva máquina térmica, dadas sus dimensiones, rendimiento, potencia y movilidad, permitieron su empleo a gran escala en la industria y el transporte.

Con el estudio de este tema se da respuesta a importantes problemáticas tales como: ¿de cuántas formas intercambian energía los diferentes sistemas? ¿Qué es el trabajo y qué es el calor? ¿Bajo qué condiciones se transforma calor en trabajo y trabajo en calor? ¿Qué principio o leyes siguen la transformación de una energía en otra? ¿Existen realmente diferentes tipos de energía o la energía en esencia es solo una? ¿Necesita la termodinámica para establecer sus leyes los conocimientos que aporta la teoría cinética molecular? ¿A qué se denomina máquinas térmicas? ¿Cómo calcular y mejorar la eficiencia de las máquinas térmicas? ¿Qué sería de la humanidad sin las máquinas térmicas? ¿Qué efectos ambientales provocan las máquinas térmicas?

Cuando fueron sentados los principios de la termodinámica los fundamentos de la teoría cinética molecular todavía no disfrutaban de la

credibilidad que esta teoría alcanzó posteriormente. El que estos principios logran explicar con magnitudes macroscópicas una amplia gama de problemas técnicos relacionados con las transformaciones de energía le dan una sólida veracidad científica. En resumen, el estudio termodinámico de los diferentes sistemas no requiere de la teoría cinético-molecular y sus fundamentos fueron sentados en el siglo XIX cuando, debido al desarrollo de las máquinas térmicas, se hizo necesario estudiar las leyes de transformación del calor en trabajo. Más tarde rebasó los límites de la termotecnia y encontró extensa aplicación en muchas ramas de la física, la química y otras ciencias.

2.8 Equilibrio térmico

A un recipiente que contiene 300 g de agua ocupando un volumen de 300 cm^3 a temperatura 27°C se le agrega 200 g de agua (200 cm^3) también a 27°C ¿Qué valor de masa, volumen y temperatura se tiene ahora?

Resulta que la masa será de 500 g con un volumen de 500 cm^3 y la temperatura se mantiene en 27°C .

De este resultado se concluye que la masa y el volumen se suman, o sea, son magnitudes aditivas. Con la temperatura no sucede igual y, por tanto, es una magnitud que no es aditiva.

Las magnitudes que se comportan como la masa y el volumen se nombran magnitudes extensivas y las semejantes a la temperatura se identifican como magnitudes intensivas.

Atando hilos cortos se tienen uno largo, así como el área del piso es la suma de las áreas de las losas que lo cubren. Longitud y área también son magnitudes extensivas. Para medir este tipo de magnitud basta con otra magnitud homogénea a ella que se toma como patrón. Unidades como m, cm, g, kg, m^2 , m^3 , cm^2 , cm^3 , etc., son ejemplo de lo dicho y cumplen su cometido gracias a que se adicionan las veces que la magnitud desconocida los contiene.

Si la temperatura no cumple con la propiedad de aditividad se infiere que no existe una magnitud homogénea que nos diga las veces que una temperatura desconocida la contenga. Puede pensarse que $^\circ\text{C}$, $^\circ\text{F}$ o K pueden servir a tales efectos, pero recuerda que en el ejemplo expuesto con el agua a 27°C la temperatura de la mezcla no alcanzó el valor 54°C

como era de esperarse para una magnitud con propiedad de aditividad. Entonces ¿cómo medir las magnitudes intensivas?

Para medir una magnitud intensiva es necesario compararla con una magnitud extensiva que cambia al variar la primera. En el caso de la temperatura pueden servir la longitud como sucede en los termómetros que contienen un líquido que modifica su longitud en el capilar al dilatarse o contraerse cuando aumenta o disminuye su temperatura. La modificación de la longitud realmente se debe a la variación del volumen que también es una magnitud extensiva. En el caso de los termómetros de gas a volumen constante es la presión la magnitud que se modifica al variar la temperatura. Pero sucede que la presión no es una magnitud extensiva y si cumple su cometido como tal es porque ella se obtiene de dividir las fuerzas en el área, o sea, el cociente de dos magnitudes intensivas derivadas de magnitudes extensivas como es el caso de la densidad calculada al dividir la masa entre el volumen o el volumen específico al dividir el volumen entre la masa.

La principal propiedad de la temperatura es el llamado **equilibrio térmico**. A principios de la segunda mitad del siglo XVIII J. Black formuló claramente la ley del equilibrio térmico indicando las condiciones en las cuales él puede establecerse:

“Todos los cuerpos que se comunican libremente unos con otros en iguales condiciones exteriores alcanzan la misma temperatura”. Está ley dice que si los cuerpos A y B están en equilibrio térmico con el cuerpo C entonces A y B también estarán en equilibrio térmico.

Al medir la temperatura con el termómetro este realmente indica su propia temperatura, pero como se puso en contacto con el cuerpo al cual se le desea medir dicha magnitud, alcanzaron el equilibrio térmico por lo que se puede asegurar que la temperatura del termómetro, aunque es la suya propia, coincide con la del cuerpo.

La ley del equilibrio térmico es reconocida por muchos autores, como la **ley cero de la termodinámica**, respetando así las leyes que históricamente se nombraron como primera y segunda. Es obvio que, en sus inicios, a la idea del equilibrio térmico no se le reconoció toda su importancia y no fue postulado como la primera ley.

¡Cuidado!

No se deben confundir los estados de equilibrio con los regímenes estacionarios. En el primero (estado de equilibrio) no varían los parámetros en el tiempo, por ejemplo, dos cuerpos pueden estar en equilibrio en una balanza. En el segundo, varían, pero las leyes de esta variación permanecen constantes en el tiempo, por ejemplo, el estado estacionario se logra con una hornilla encendida y un sartén, después de pasado un tiempo largo ya no varía la temperatura del sartén, pero se sigue transmitiendo energía.

Comprueba tus conocimientos

- 33.** Explica qué ocurre cuando dos sistemas, inicialmente a diferente temperatura, se ponen en contacto.
- 34.** Si usas un termómetro para medir la temperatura de tu cuerpo, ¿qué mide el termómetro, su temperatura o la de tu cuerpo? Explica brevemente lo que ocurre.
- 35.** ¿Qué plantea la ley cero de la termodinámica?

2.9 Calor

El hombre primitivo comenzó a utilizar el fuego como fuente de calor 500 000 años antes de nuestra era, pero se necesitaron muchos siglos para que se respondiera correctamente a la interrogante ¿qué es el calor?

La primera hipótesis del calor consistió en considerarlo como en un fluido llamado calórico capaz de penetrar en todo cuerpo cuando se calienta o salir de él cuando se enfría.

Dicho fluido no se crea ni se destruye, sino que solo se redistribuye entre los cuerpos y al desaparecer totalmente de alguno de ellos entonces este alcanza el cero absoluto.

Semejante modelo del calor primó durante los siglos xvii y xviii, alcanzando amplio reconocimiento a finales de este último. Los químicos explicaban la combustión por desprendimiento calórico y hasta la teoría de Carnot, sobre el motor térmico, se ajustó al modelo.

Si el modelo descrito alcanzó reconocimiento de prestigiosos científicos se debe a que cuando un cuerpo se calienta es verdad que recibe “algo”, además ese “algo” se conserva al ser intercambiado entre cuerpos a diferente temperatura.

En 1620 el filósofo inglés Francis Baco (1561-1626) prestó atención a lo conocido por cualquier herrero: bajo los fuertes golpes del partillo el pedazo de hierro frío se calienta. La fricción de maderos produce fuego. Del examen de este y otros fenómenos similares concluyó:

El calor es el movimiento interno de las diminutas partículas del cuerpo y la temperatura se determina por su velocidad. A esta teoría se le llamó teoría mecánica del calor, la cual fue fundamentada y desarrollada por el genial sabio ruso H. V. Lomonósov (1711-1765).

Esta nueva teoría del calor encontró otros seguidores como el norteamericano Benjamín Thompson (1753-1814) que después se convirtió en el conde Rumford de Baviera. El observó, en el depósito militar de Múnich, que al taladrar los tubos de los cañones se producía un calentamiento proporcional al tiempo de operación y mucho más intenso cuando las barrenas estaban mal afiladas. La teoría del calórico se hizo inoperante ante tales resultados.

Tanto la teoría mecánica como la del calórico consideran al calor como una propiedad de los cuerpos determinada por el estado del sistema y que la variación de la cantidad de calor depende solo del estado inicial y final del proceso de cambio, independientemente de la forma en la que se produzca la transición del sistema.

En el siglo XIX la ciencia llegaría a una conclusión muy importante: el calor no está contenido en el sistema y, por tanto, no es una propiedad de este. Esta nueva concepción elimina la teoría del calórico y considera que la energía mecánica de las partículas del cuerpo es otra magnitud llamada **energía interna, térmica o calorífica**.

Lo expresado pudiera sugerir la idea de que el calor no existe, pero sucede que la magnitud identificada con tal nombre encuentra amplio uso en la vida cotidiana, la tecnología y la ciencia.

En esencia, llamaremos calor al proceso mediante el cual se transmite energía de cierto cuerpo a otro (o de una parte a otra del mismo cuerpo), que tienen diferentes temperaturas, por medio de sus átomos o moléculas.

De lo anteriormente expuesto se puede concluir que durante la transmisión de energía de un cuerpo mediante el proceso que denominamos

calor, el sistema tiene las condiciones para que la energía del movimiento molecular sea transferida del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, sin que ocurra variación del parámetro macroscópico volumen, aunque si pueden variar otros parámetros macroscópicos como la temperatura y la presión. Más adelante, será analizada otra forma de transmitir energía en la que ocurre variación del volumen y se identifica como trabajo

Al calor se le acostumbra a denotar por la Q y las unidades en que se mide son las mismas que se usan para la energía, o sea, el joule (J).

Antes se utilizaban otras unidades como la caloría (cal), que aún permanece en uso. Por ejemplo, todavía aparece este término en las descripciones nutricionales de algunos alimentos.

Por otra parte, al ver los datos técnicos de un acondicionador de aire encontramos la llamada unidad térmica británica cuyo símbolo es Btu.

Las equivalencias de estas unidades con el joule son:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J} \approx 4,2 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1055 \text{ J}$$

Puede ser útil recordar que la transferencia de energía en forma de calor entre un sistema y su entorno puede ocurrir de tres formas diferentes llamadas conducción, convección y radiación.

Sugerencia: repasa las características de cada una de estas formas de transferencia de energía.

Comprueba tus conocimientos

- 36.** ¿A que llamamos calor? ¿En qué unidades se mide?
- 37.** Expón una hipótesis que explique la razón por la cual unas sustancias son buenas y otras malas conductoras del calor. Menciona ejemplos de cada tipo y su uso en la vida cotidiana.
- 38.** Si los gases de la combustión se quedaran rodeando la llama, un incendio se apagaría por sí solo al faltar el oxígeno ¿Por qué no ocurre así?
- 39.** De cursos anteriores: Si es necesario revisa en los libros y describe brevemente en qué consiste la transmisión de energía por conducción, convección y radiación. Además, di qué es el calor específico de una sustancia.

40. Si no lo conoces, indaga con tus padres o abuelos, en qué consiste el término culinario llamado baño de María. Explica la razón por la cual el agua contenida en el recipiente interior no hierve, si la que lo rodea sí lo está haciendo.

2.10 El trabajo en la termodinámica

Sabemos que una fuerza realiza trabajo mecánico si existe desplazamiento en la dirección de la fuerza y que su valor, si la fuerza es constante, queda definido por la ecuación:

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{S} \text{ o } W = F \cdot S \cos\alpha$$

Donde α , es el ángulo formado entre la dirección de la fuerza $\vec{F}$ y del desplazamiento $\Delta\vec{S}$.

En la figura 2.15 se representa un cilindro que contiene cierta cantidad de gas ideal encerrado mediante un émbolo móvil carente de rozamiento.

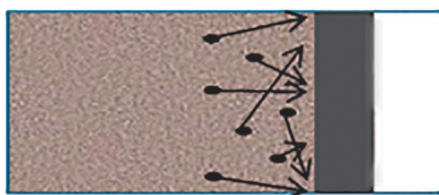


Fig. 2.15 El cilindro contiene un gas

Conocemos que la presión sobre las paredes del recipiente se debe a los choques de las moléculas del gas contra estas. Si como consecuencia de esto, el émbolo se desplaza una cantidad Δx , el trabajo realizado por el émbolo sobre el medio exterior estará dado por:

$$W = F\Delta x$$

Como: $F = PA$, donde P es el valor de la presión y A el área de la superficie del émbolo, se puede escribir que:

$$W = PA\Delta x$$

Pero el producto $A\Delta x$, es igual a la variación del volumen (ΔV), del recipiente cuando el émbolo se desplaza en Δx . Por lo tanto:

$$W = P\Delta V$$

$$2.16$$

Puede ser conveniente precisar que:

- La ecuación 2.16 es válida solo si la presión es constante, es decir para procesos isobáricos. Esto quiere decir que al aumentar el volumen debe aumentar la temperatura para que la presión se mantenga constante. Desde el punto de vista microscópico lo que sucede es que al aumentar el volumen disminuye el número de choques y ello implica un aumento de la energía cinética de las moléculas para mantener la presión constante.
- Como la presión nunca es negativa el signo del trabajo realizado por el sistema es determinado por la variación de volumen. Si el volumen aumenta ($\Delta V > 0$) el trabajo es positivo. Si el volumen disminuye ($\Delta V < 0$) el trabajo es negativo
- Cuando la fuerza ejercida por el gas hace trabajo positivo el sistema está entregando energía al medio exterior. Un trabajo negativo de dicha fuerza significa que el sistema recibe energía.

El proceso isobárico descrito se puede representar en una gráfica de $P = f(V)$ como se observa en la figura 2.16

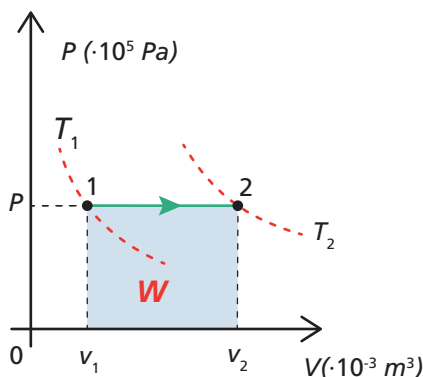


Fig. 2.16 Trabajo termodinámico realizado por el gas ($V_2 > V_1$)

Nota que el área bajo la curva es numéricamente igual valor del trabajo.

Comprueba tus conocimientos

- 41.** Representa un proceso isobárico experimentado por cierta masa de gas ideal en una gráfica de $P = f(V)$. Toma $P = 2,0 \cdot 10^5$ Pa; $V_1 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ m³ y $V_2 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ m³

- a) Calcula el trabajo realizado por el gas
- b) Sombrea el área bajo la gráfica. Calcula su valor y verifica que es numéricamente igual al trabajo.
- c) ¿Por qué durante el proceso el gas debe absorber calor para que el proceso sea isobárico?

42. Representa en una gráfica de $P = f(V)$ un proceso isotérmico para un gas ideal.

- a) Sombrea el área correspondiente al trabajo realizado por el gas y di su signo.
- b) Para realizar trabajo: ¿el gas absorbe o cede calor? ¿Cómo se explica que su temperatura permanezca constante?
- c) ¿Qué le sucede a la presión en este proceso? Explica
- d) Con tus conocimientos matemáticos, ¿puedes calcular el área bajo la curva? Explica.

2.11 Equivalente mecánico del calor

¿Cómo se puede calentar un cuerpo sin ponerlo en contacto con otro a mayor temperatura?

En invierno calentamos nuestras manos friccionándolas. El hombre primitivo incendiaba un madero friccionándolo con otros. El carpintero sabe que la fricción del disco de la sierra le puede quemar la madera. Los meteoritos arden al penetrar en la atmósfera. Se calientan mucho las piezas móviles de un mecanismo cuando no están lubricadas.

En los ejemplos expuestos se aprecia que entre los cuerpos en interacción no existe diferencia de temperatura para que fluya calor del más caliente al más frío. Resulta obvio que el calentamiento se ha producido cuando la fuerza de rozamiento trabaja.

Durante la realización de trabajo parte del movimiento ordenado se ha transformado en movimiento desordenado a nivel molecular manifestándose como aumento de la temperatura. No se debe entender que el trabajo se transformó en calor directamente. El trabajo y el calor son formas diferentes de variar la energía de un sistema.

Como el calor se medía en calorías (cal) y el trabajo en joules (J) fue necesario determinar una relación empírica entre ambos. Este mérito correspondió James Joule, quien en 1850 diseñó el experimento representado en la figura 2.17.

Al descender los cuerpos las paletas rotan y ello provoca elevación de temperatura en el líquido contenido en el recipiente. Conociendo la masa y el desplazamiento de los cuerpos se puede calcular el trabajo realizado. Por otra parte, midiendo la variación de temperatura se puede determinar la cantidad de calor que debería suministrarse al líquido para elevar la temperatura al mismo valor.

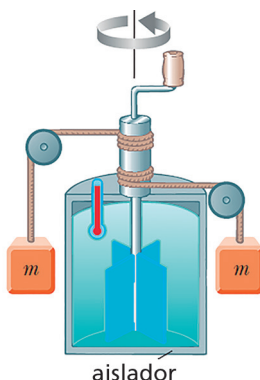


Fig. 2.17 Calorímetro de Joule

Al calcular la razón $\frac{W}{Q}$, Joule obtuvo el valor $4,1868 \text{ J/cal} \approx 4,19 \text{ J/cal}$ llamado equivalente mecánico del calor.

Precisos y numerosos experimentos han confirmado que cada $4,19 \text{ J}$ de energía en forma de trabajo equivalen a una cantidad de calor igual a 1 cal . De igual forma, cada caloría transformada en trabajo mediante una máquina térmica equivale a $4,19 \text{ J}$.

Comprueba tus conocimientos

- 43.** Justamente después de descascarado el arroz la temperatura de los granos y de la paja residual es superior ¿A qué se debe?
- 44.** Al taladrar gruesas piezas metálicas se vierte continuamente un líquido especial en el lugar donde perfora la barrena.
 - a) ¿Con qué objetivo se hace? Explica.
 - b) ¿Por qué las barrenas deben estar bien afiladas?
- 45.** Los neumáticos de un auto que trata de salir del reposo rápidamente liberan humo como consecuencia del deslizamiento de su superficie con la carretera.

- a) ¿Cómo se explica tal fenómeno?
- b) Para evitar este efecto, ¿qué le recomendarías al conductor? Fundamenta la recomendación.

2.12 Energía interna del gas ideal

De acuerdo con la ley de conservación y transformación de la energía cuando se suministra energía a un sistema en forma de calor (Q) y(o) trabajo (W), esta queda almacenada en forma de energía interna (U) del sistema.

$$U = Q + W \quad 2.17$$

Para el caso de un gas ideal monoatómico, lo anteriormente expuesto, se simplifica considerablemente al considerarlo como un conjunto de partículas que no interactúan entre sí y que, por lo tanto, toda la energía interna del gas se asocia solo con la energía cinética de traslación de las partículas. Para un estado del gas ideal:

$$U = N \bar{E}_c, \text{ } N \text{ es el número de partículas por unidad de volumen.}$$

Por lo tanto, para un gas ideal monoatómico se tendrá que:

$$U = N \left(\frac{3}{2} kT \right)$$

Multiplicando y dividiendo el miembro derecho de la ecuación por el número de Avogadro N_A

$$U = \frac{N}{N_A} \cdot \frac{3}{2} \cdot k N_A T$$

$$U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T \quad 2.18$$

La ecuación indica que la energía interna del gas ideal solo depende de la temperatura del estado y esta última de la energía cinética de traslación de las moléculas.

Más importante que conocer el valor absoluto de la energía interna de un estado, resulta calcular su variación cuando se modifica la temperatura, o sea,

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \quad 2.19$$

A cada forma de movimiento que puede asumir parte de la energía total de la molécula se le llama grado de libertad. Para el gas ideal

monoatómico ya fue demostrado que la energía cinética total media de una molécula $\bar{E}_c = \frac{3}{2}kT$ se obtiene al sumar $\frac{1}{2}m\overline{v_x^2} + \frac{1}{2}m\overline{v_y^2} + \frac{1}{2}m\overline{v_z^2}$ de lo que se infiere que tiene tres grados de libertad (uno por cada dimensión espacial). Además, por cumplirse la condición $\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$ para la misma molécula, resulta que a cada grado de libertad le corresponde la misma cantidad de energía $\frac{1}{2}kT$. A este principio se le conoce como principio de equipartición de la energía. Numerosos experimentos concuerdan con la teoría al demostrar que para los grados de libertad correspondientes a movimientos de rotación y vibración en moléculas más complejas corresponde igual valor de energía $\frac{1}{2}kT$.

Para una molécula diatómica formada por dos átomos considerados como partículas puntuales, con su eje a lo largo del eje z existen 5 grados de libertad (tres de traslación y dos de rotación) como se representa en la figura 2.18.

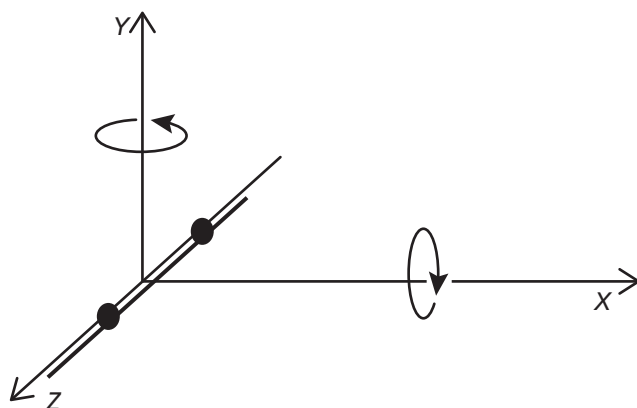


Fig. 2.18 Grados de libertad para una molécula

El que no exista energía asociada con el tercer grado de libertad (rotación en el eje z) se justifica porque los átomos son puntuales y no se les puede hacer girar, lo que es explicado por la física cuántica.

Para temperaturas elevadas (por encima de los 2 000 K) existen otros dos grados de libertad correspondientes al movimiento vibratorio.

En los gases poliatómicos (de 3 o más átomos) se pueden manifestar 3 grados de libertad de traslación, 3 de rotación y 2 de vibración. De lo expuesto se infiere la importancia de conocer la estructura de las moléculas del gas con que se trabaja y su temperatura, ya que al tener diferentes

grados de libertad para una misma variación de temperatura necesitan diferentes cantidades de energía.

Como la variación de la energía interna solo depende de su estado inicial y de su estado final, es una función de estado.

Recordemos que con el trabajo y el calor no sucede igual, estas magnitudes dependen del tipo de proceso, es decir, el calor y el trabajo son características cuantitativas de diferentes formas de variación de la energía interna del sistema y no tipos especiales de energía.

Comprueba tus conocimientos

- 46.** ¿De qué tipo es la energía interna de un gas ideal, cinética o potencial? Explica
- 47.** ¿En qué isoprocesos la energía interna del gas permanece constante? Representalo en un plano de $P-V$
- a) ¿Absorbe o cede calor?
- b) Si intercambia calor ¿por qué no experimenta variación su energía interna?

2.13 Primer Principio de la Termodinámica

El concepto de energía interna nos permite precisar la ley de conservación de la energía para el caso de los fenómenos térmicos.

Cuando a un sistema se le entrega cierta cantidad de energía, el cambio termodinámico del sistema puede implicar la variación de la energía interna del sistema, la realización de trabajo por parte de este o ambas cosas. Es decir, puede producirse una variación de la energía interna y un trabajo por parte del sistema.

En consecuencia, se puede plantear que:

Durante el proceso en que un sistema pasa de un estado a otro, la variación de la energía interna del sistema ΔU , más el trabajo realizado por el sistema (W) será igual a la cantidad de energía recibida por el sistema (Q).

En símbolos:

$$Q = W + \Delta U \quad 2.20$$

Este es el enunciado de la primera ley (o primer principio) de la termodinámica.

Se debe tener en cuenta que si el sistema absorbe energía la cantidad de calor (Q) se considera positiva y si el sistema realiza trabajo, W también es positivo.

Aplicaciones del primer principio de la termodinámica a diferentes procesos.

Proceso isocórico

$$Q = W + \Delta U$$

Pero para un proceso isocórico $W = 0$ pues el volumen no cambia, por lo tanto:

$$Q = \Delta U$$

$$Q = \frac{3}{2}nR \cdot T \quad 2.21$$

Ecuación que permite calcular la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un sistema en Δt , durante un proceso isocórico.

La ecuación 2.21 se puede escribir como:

$$Q = nC_V\Delta T \quad 2.22$$

Donde $C_V = \frac{3}{2}R$, es el calor específico molar a volumen constante, expresa la energía necesaria para que un mol de gas ideal monoatómico varíe su temperatura en 1,0 K a volumen constante.

Proceso isobárico

$$Q = W + \Delta U$$

Como en este caso

$$W = P\Delta V = nR\Delta T \text{ y } \Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

Sustituyendo

$$Q = nR\Delta T + \frac{3}{2}nR\Delta T$$

$$Q = \frac{5}{2}nR\Delta T \quad 2.23$$

La ecuación 2.23 se puede escribir como:

$$Q = nC_p\Delta T \quad 2.24$$

Donde $C_p = \frac{5}{2}R$ es el calor específico molar a presión constante (C_p) y expresa la energía necesaria para que un mol de gas ideal monoatómico varíe su temperatura en 1,0 K a presión constante.

Proceso isotérmico

$Q = W + \Delta U$ Como no hay variación de temperatura $\Delta U = 0$:

$$Q = W$$

Esto significa que, si al sistema recibe (absorbe) calor, realiza trabajo positivo porque el volumen aumenta. Si cede calor ocurre lo contrario.

Proceso adiabático

Existen procesos donde el sistema, por tener paredes aislantes del calor o por transcurrir muy rápidamente, no permite el intercambio de energía (calor) con los alrededores. A tal proceso se le llama adiabático.

Aunque tal proceso también constituye una idealización, hay muchos casos prácticos a los que se puede aplicar este modelo con muy buena aproximación.

$$Q = W + \Delta U$$

Como en un proceso adiabático $Q = 0$, para este tipo de proceso se tiene que:

$$W = -\Delta U \quad \text{Para una expansión adiabática}$$

En todos los casos se ha considerado que el sistema es un gas ideal monoatómico. Si las moléculas no son monoatómicas se deben tomar los valores de C_v y C_p teniendo en cuenta los grados de libertad que tengan.

Problema resuelto 2.7

Un metro cúbico de un gas está a la presión de $5,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ y a 500 K de temperatura. Si isobáricamente su temperatura se reduce a 250 K, determina:

- El trabajo realizado en el proceso.
- La variación de energía interna.
- La energía absorbida o cedida por el gas.

Solución:

Para resolver este problema debemos considerar que el gas se comporta como un gas ideal monoatómico.

a) En los procesos isobáricos se cumple que:

$$W = nR\Delta T \quad (1)$$

No se conoce la cantidad de sustancia n , por lo que se debe encontrar este valor aplicando la ecuación de estado para el estado inicial del gas:

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

Al despejar la cantidad de sustancia:

$$n = \frac{P_1 V_1}{RT_1} \quad (2)$$

Al sustituir (2) en (1)

$$W = \frac{P_1 V_1}{RT_1} \cdot R\Delta T$$

$$W = \frac{5,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot 1,0 \text{ m}^3}{5,0 \cdot 10^2 \text{ K}} \cdot (2,5 \cdot 10^2 - 5,0 \cdot 10^2) \text{ K}$$

$$W = -2,5 \cdot 10^5 \text{ J}$$

El trabajo del gas durante un enfriamiento isobárico es de signo negativo. El volumen disminuye realizan trabajo sobre él.

b) $\Delta U = nC_v \Delta T$

Como $C_v = \frac{3}{2}R$ y $n = \frac{P_1 V_1}{RT_1}$, al sustituir:

$$\Delta U = \frac{P_1 V_1}{RT_1} \cdot \frac{3}{2}R \cdot (T_2 - T_1)$$

La ecuación solución es:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{P_1 V_1}{T_1} \cdot (T_2 - T_1)$$

Sustituyendo por los valores numéricos se obtiene

$$\Delta U = \frac{3}{2} \left(\frac{5,0 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (1,0 \text{ m}^3)}{500 \text{ K}} \right) (250 \text{ K} - 500 \text{ K}) = -3,75 \cdot 10^5 \text{ J}$$

La energía interna disminuye, el gas se enfría.

- c) Para calcular la cantidad de energía intercambiada por el gas se aplica el primer principio de la termodinámica:

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = -2,5 \cdot 10^5 \text{ J} + (-3,75 \cdot 10^5 \text{ J})$$

$$Q = -6,25 \cdot 10^5 \text{ J}$$
 El sistema entrega esta cantidad de energía.

Comprueba tus conocimientos

- 48.** ¿Qué plantea la primera ley de la termodinámica?
- 49.** Escribe la formulación matemática de la primera ley de la termodinámica y explicita la significación física de cada uno de los términos de la ecuación planteada.
- 50.** ¿Qué son los procesos adiabáticos?
- 51.** ¿Cómo queda la expresión matemática de la primera ley de la termodinámica en cada uno de los siguientes procesos?
- a) procesos isotérmicos,
 - b) procesos isocóricos,
 - c) procesos isobáricos,
 - d) procesos adiabáticos.

2.14 Segunda ley de la termodinámica. Máquinas térmicas

La segunda ley o segundo principio de la termodinámica da el sentido de las posibles transformaciones de la energía, y expresa la irreversibilidad de los procesos en la naturaleza.

Hay algunas formulaciones de la segunda ley de la termodinámica que, sin tener en cuenta ciertas diferencias externas, expresan en esencia lo mismo y, por tanto, son equivalentes.

Una formulación se debe al científico inglés William Thomson (Lord Kelvin) y se denomina **principio de Thomson o de Kelvin**:

Es imposible que ocurra un proceso periódico cuyo único resultado sea la obtención de trabajo a cuenta de calor tomado de una fuente.

Otra formulación equivalente de la segunda ley es la siguiente:

Formulación de Clausius

Es imposible que el calor pueda pasar espontáneamente de un cuerpo frío a uno caliente sin la realización de un trabajo externo.

En correspondencia con el segundo principio, si una máquina de vapor realiza trabajo a cuenta del calor tomado de una caldera de vapor, entonces el trabajo obtenido de este modo **no es** el único resultado del proceso, pues parte del calor, obligatoriamente, va a la atmósfera junto con el vapor de escape. Lo mismo pasa en las máquinas de combustión interna y, en general, en todos los motores térmicos. Dicho de otra manera, ningún motor térmico puede tener una eficiencia térmica tal que convierta totalmente en trabajo mecánico la energía que se le entrega de forma cíclica.

Como coeficiente de eficiencia térmica de un motor térmico (η) se entiende la relación entre el trabajo realizado por la máquina (W), y la cantidad de energía (Q) entregada para este, o sea:

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad 2.25$$

El número de ejemplos que demuestran esta ley puede aumentar ilimitadamente. Todos ellos manifiestan que los procesos térmicos tienen un *sentido* definido, sin violar de alguna forma la primera ley de la termodinámica. De hecho, la mayoría de los procesos en la naturaleza ocurren espontáneamente solo en un sentido definido. Los procesos en la naturaleza son, en general, irreversibles. Los más trágicos de ellos son el envejecimiento y la muerte de los organismos.

Procesos reversibles e irreversibles

Puntualicemos el concepto de proceso irreversible. *Se entiende por proceso irreversible aquel cuyo inverso puede ocurrir solo como uno de los eslabones de un proceso más complejo.* Así, por ejemplo, en el caso de un péndulo; se puede aumentar de nuevo la amplitud de sus oscilaciones golpeándolo con la mano. Pero este aumento de la amplitud no surge por sí solo, sino que es posible como resultado de un proceso más complejo, el golpe con la mano. Por otro lado, en principio, se puede hacer pasar calor de un cuerpo frío a otro más caliente, pero para esto es necesario un equipo de enfriamiento que consuma energía.

Una buena ilustración de fenómeno irreversible en la naturaleza es la proyección de una película en el sentido inverso. Por ejemplo, al observar en sentido inverso un salto al agua de una piscina será visto de la siguiente manera: el agua tranquila en la piscina comienza a agitarse, aparecen las piernas que precipitadamente se mueven hacia arriba y después todo el individuo. La superficie del agua rápidamente se pone en reposo. Poco a poco la velocidad del clavadista disminuye y se le encuentra parado en el trampolín. Lo que nosotros vemos en la pantalla pudiera ocurrir en la realidad si los procesos pudieran invertirse. El absurdo de esto se deriva de que estamos acostumbrados a un sentido determinado de los procesos y no dudamos de la imposibilidad de que ocurran en sentido contrario. No requiere mucho análisis comprender que el proceso de la ascensión del clavadista del agua al trampolín no contradice la ley de conservación de la energía ni las leyes de la mecánica ni alguna otra ley, excepto la segunda ley de la termodinámica.

Dos ejemplos de proceso irreversibles son: el paso de calor de un cuerpo caliente a uno frío y la transformación de la energía mecánica en energía interna.

La formulación de la segunda ley plantea la imposibilidad de construir un móvil que realice trabajo solo por cuenta del enfriamiento de algún cuerpo. Un móvil así no infringe la ley de conservación de la energía. Por ejemplo, de existir este tipo de proceso dispondríamos, en la práctica, de una fuente ilimitada de trabajo; pues esto se podría lograr realizando trabajo como consecuencia del enfriamiento de los océanos. Sin embargo, en cuanto la temperatura del océano se hiciera inferior a la temperatura ambiente se necesitaría el paso de calor de un cuerpo más frío a uno más caliente y tal proceso no puede ocurrir por sí mismo.

Interpretación estadística de la direccionalidad de los procesos físicos

La esencia física de la irreversibilidad de los procesos físicos puede ser comprendida solo sobre la base de la teoría cinético molecular. Una idea intuitiva podemos obtenerla si nos auxiliamos de un modelo de cómo ocurre el proceso de difusión.

Dividamos una caja de cartón a la mitad con un tabique que tenga un orificio en el medio. Coloquemos en la mitad izquierda varios frijoles negros y en la derecha frijoles blancos (puede echarse también bolas de distintos colores).

Demos vuelta a la caja y observemos el resultado. Como es de esperar, los frijoles se mezclarán en ambos lados. Al cabo de varias vueltas la mezcla será uniforme en cada lado. Nada impide, en las leyes físicas, que al cabo de muchas vueltas en cada lado aparezcan de nuevo separados los frijoles. ¿Por qué no ocurre? ¿En qué se parece este proceso al de la difusión?

La explicación podemos buscarla en las características del movimiento de las partículas y en el número extraordinariamente grande de ellas. Si el número de bolas o frijoles fuera de dos o cuatro y las colocamos todas en un solo lado de la caja, entonces es posible esperar que al agitar la caja todas lleguen a colocarse en un solo lado de nuevo, mientras que cuando el número de bolas aumenta, ese suceso que a todas luces es posible, se hace cada vez menos probable.

Sabemos que el número de moléculas por centímetro cúbico en condiciones normales, en cualquier cuerpo, es cerca de 10^{22} moléculas. El proceso simulado con bolas o frijoles con las diferencias lógicas de esa simplificación, permite comprender que algo similar ocurre en los fenómenos moleculares como la difusión y otros. También en el intercambio térmico entre dos cuerpos ocurre algo parecido. Los choques continuos entre las moléculas mediante los cuales un cuerpo cede energía a otro (uno se calienta y el otro se enfría) provocan una distribución de la energía entre las moléculas tal que el proceso inverso es poco probable. Si eso ocurriera el cuerpo frío debería calentarse espontáneamente y el cuerpo caliente enfriarse.

Motores térmicos

El escaso potencial científico y tecnológico del hombre primitivo lo obligó a vivir con pocos recursos. En la medida que fue aprendiendo a utilizar mejor los recursos naturales se crearon las condiciones necesarias para un aumento de la población, que a su vez demandaba mayor cantidad de bienes materiales (ropa, calzado, viviendas, alimentos) para subsistir. Para suplir tales necesidades no era suficiente en trabajo físico, por lo que comenzó a emplear el trabajo realizado por animales, la fuerza del viento y del agua, así como el calor generado por el Sol.

De lo dicho se infiere que el hombre comenzó a demandar de la naturaleza cantidades de energía cada vez mayores.

La revolución industrial inglesa no fue casual. El trabajo en las grandes textilerías y en las minas, para extraer carbón y otros minerales, exigían la realización de grandes cantidades de trabajo en corto tiempo.

Las correcciones introducidas por el ingeniero James Watt a la máquina de vapor hicieron de este dispositivo el corazón de la revolución industrial que más tarde se extendió a otros países, a la vez que, su uso se hizo extensivo a barcos, locomotoras, etcétera.

Para la creación de bienes materiales se necesita energía que alimente a los diferentes dispositivos, independientemente de que sean máquinas o seres vivos. Es conocido que la energía se encuentra almacenada mayormente en los combustibles. Ello determinó que la humanidad emprendiera el llamado camino energético duro que utiliza a los combustibles fósiles como fuente de energía (al uso de las energías renovables como la eólica, solar, biomasa, etc., se le llama camino energético suave).

Dentro de los combustibles fósiles, los más representativos son el carbón y el petróleo, siendo este último el predominante al ofertar algo más del 80 % de la energía consumida en el planeta. Resulta asombrosa la adición al petróleo si se tiene en cuenta que el primer pozo de este combustible se comenzó a explotar en Pensilvania (EE. UU.) por el año 1859. Sin siquiera sospecharlo, el hombre comenzó a gestar lo que hoy constituye la mayor pesadilla de la humanidad.

Son ejemplos de máquinas térmicas las turbinas de vapor usadas en centrales termoeléctricas, los motores de combustión interna que mueven los diferentes medios de transporte, los motores de reacción, etcétera.

La estructura de una máquina térmica puede ser muy compleja, pero en esencia todas constan de tres partes esenciales: foco caliente o fuente de calor, sustancia de trabajo y foco frío (figura 2.19).

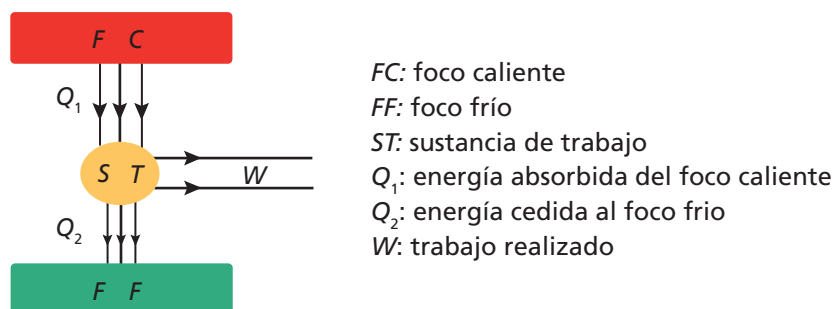


Fig. 2.19 Máquina térmica

El sencillo experimento representado en la figura 2.20, donde se observa a un tubo de ensayo (3) cerrado con un tapón y conteniendo

agua (2) que es calentada, demuestra que se puede realizar trabajo (W) a partir de la energía suministrada (Q) mediante un proceso térmico (1).

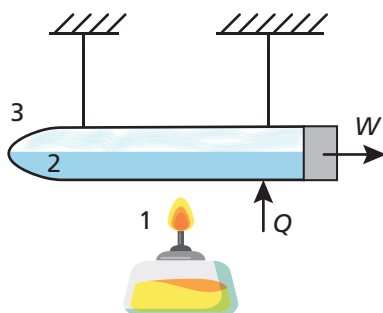


Fig. 2.20

El trabajo constituye la energía útil que entrega la máquina al recibir la cantidad de energía Q_1 proveniente del foco caliente. La cantidad de energía Q_2 , entregada al foco frío, pasa al medio que rodea a la sustancia de trabajo y se considera como "energía perdida" (o degradada al no poder usarse como energía útil)

Resulta de gran importancia conocer qué parte de la energía gastada se convirtió en útil. Ya sabemos que a la razón entre la energía útil y la energía gastada se conoce como eficiencia de la máquina térmica (η)

$$\eta = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía gastada}}$$

Por ley de conservación de la energía

$W = Q_1 - |Q_2|$ Donde aparece el módulo de Q_2 porque es cedido y debía tomarse con signo negativo, si se respeta el convenio de signo ya establecido.

Entonces:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \quad 2.26$$

Como siempre pasa calor al foco frío, la razón $W/Q_1 < 1$. La eficiencia se puede expresar en porcentaje, si la ecuación 2.26 se multiplica por el 100 %, o sea,

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \cdot 100 \% \quad 2.27$$

La cantidad de energía obtenida del foco caliente Q_1 implica quemar cierta cantidad de combustible. Sobre esto último aparece en tablas de constantes físicas el llamado calor de combustión o poder calorífico (q), cuyo valor representa la energía que entrega la unidad de masa del combustible al quemarse totalmente

Para algunos combustibles:

$$q_{\text{petróleo}} = 4,4 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$q_{\text{gasolina}} = 4,6 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$q_{\text{carbón de piedra}} : \text{de } 2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{ a } 3,0 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$q_{\text{alcohol}} = 2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$q_{\text{leña seca}} = 1,0 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Si el poder calorífico de un combustible es conocido

$$Q = mq$$

Otro dato importante de una máquina térmica, casi siempre indicado por su fabricante, es su potencia. Se debe recordar que dicha magnitud se calcula con la ecuación

$$P = \frac{W}{\Delta t}, \text{ donde } \Delta t \text{ es el tiempo, en segundos, y } W \text{ el trabajo en joules.}$$

Recordemos que en el Sistema Internacional las unidades de potencia más usadas son:

$$1,0 \text{ W (Watt)} = 1,0 \text{ J/s}$$

$$1,0 \text{ kW (kilowatt)} = 1\,000 \text{ J/s} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ J/s}$$

$$1,0 \text{ MW (Megawatt)} = 1\,000\,000 \text{ J/s} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ J/s}$$

$$1,0 \text{ GW (Gigawatt)} = 1\,000\,000\,000 \text{ J/s} = 1,0 \cdot 10^9 \text{ J/s}$$

En Inglaterra, EE. UU. y otros países que han intercambiado tecnología entre ellos (en el pasado o actualmente) es muy usada la unidad de potencia *horse power* (hp) o caballo de fuerza cuya equivalencia es $1 \text{ hp} = 764 \text{ W}$. Dicho nombre, surgió en Inglaterra al sustituir el trabajo de caballos por máquinas térmicas.

Para que en la máquina térmica ocurra de forma continua la transformación de calor en trabajo es necesario que ocurra un proceso cíclico, o sea, que se repita en el espacio y el tiempo. Ello implica que en una parte del proceso la sustancia de trabajo absorba energía del foco caliente (Q_1) y seguidamente recupere la temperatura inicial cediendo parte de esa energía al foco frío (Q_2). En la figura 2.21 se representa una de las formas en que puede ocurrir un proceso cíclico entre las temperaturas T_1 y T_2 , representado en un plano P - V . El área sombreada es numéricamente igual al trabajo total o neto realizado por la máquina sobre el medio en cada ciclo.

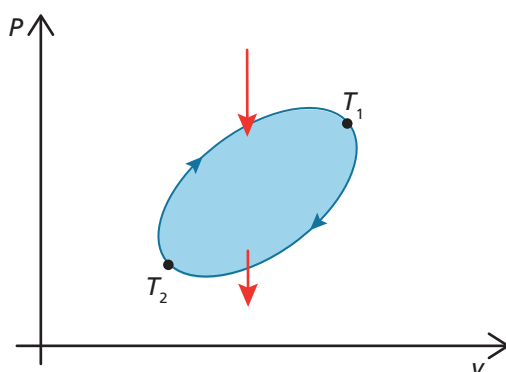


Fig. 2.21 Proceso cíclico en una máquina térmica

La transformación puede estar compuesta por los procesos ya estudiados, lo cual facilita realizar cálculos de W , ΔU y Q . Al concluir el ciclo $\Delta U = 0$ por ser $\Delta T = 0$.

Otro tipo de máquinas térmicas de gran importancia son las máquinas refrigerantes, o refrigeradores, tan usado en nuestra vida cotidiana. Lo especial de esta máquina consiste en que al funcionar extrae energía del foco frío (interior del refrigerador) y lo envía hacia el foco caliente (medio que rodea a la máquina).

Semejante transferencia de calor no ocurre de forma espontánea por lo que es necesaria la acción de un agente externo que realice trabajo. Dicho dispositivo; para el caso de los refrigeradores domésticos, lo constituye el compresor.

El esquema de una máquina refrigerante se muestra en la figura 2.22

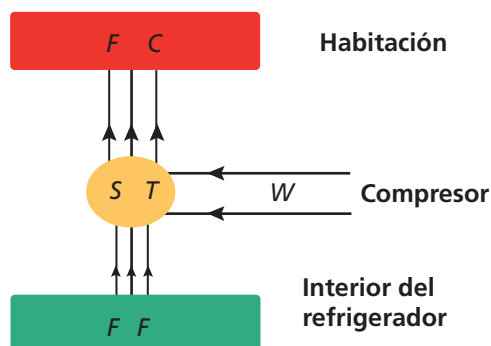


Fig. 2.22 Máquina refrigerante

A la eficiencia del refrigerador se le llama coeficiente de rendimiento (K). Si se asume que Q_2 es la energía útil y W la gastada

$$K = \frac{|Q_2|}{|W|}$$

Pero como:

$$|Q_1| = |Q_2| + |W|$$

Se tiene entonces que:

$$|W| = |Q_1| - |Q_2| \text{ y}$$

$$K = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} \quad 2.28$$

El coeficiente de eficiencia K toma valores superiores a 1,0 por lo que no es usual expresarlo en porciento como la eficiencia.

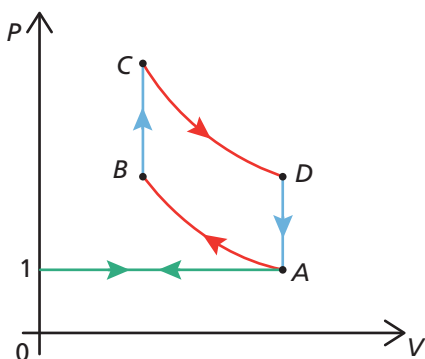
Los valores del coeficiente de rendimiento se acotan por lo general entre 2 y 10, lo que indica que la energía útil es superior a la gastada, si tomamos esta última como el trabajo exterior. ¿Significa este resultado que se viola la ley de conservación de la energía? Cuando se toma el valor del trabajo no se tiene en cuenta la cantidad de energía invertida para obtener la corriente eléctrica que alimenta al compresor. Un análisis más profundo debe comenzar desde la planta generadora de electricidad, cuya eficiencia oscila entre el 30 % y 40 %. Además, en las líneas conductoras se "pierde" entre un 10 % y un 20 % (en dependencia de su calidad) y el propio compresor disipa parte de la energía eléctrica en forma de calor. Vale decir, ¡no está en duda la ley de conservación de la energía!

Ciclos térmicos. Ciclo de Carnot.

Máxima eficiencia de una máquina térmica

Al funcionar las máquinas térmicas, la sustancia de trabajo experimenta cambios de estados continuos de forma cíclica. Estos cambios en realidad son irreversibles y, por tanto, no representables en un plano P - V . No obstante, se pueden representar procesos ideales reversibles que dan idea aproximada del funcionamiento de un motor térmico.

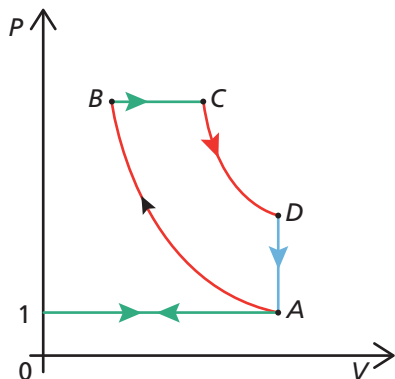
El ciclo reversible ideal para el motor de gasolina de cuatro tiempos, llamado ciclo de Otto, se representa en la figura 2.23.



Donde, comenzando en 1:
 1-A: admisión a presión constante.
 A-B: compresión adiabática
 B-C: explosión o ignición del combustible
 C-D: expansión adiabáticas o carrera de trabajo
 A-1: escape de productos de la combustión.
 Su eficiencia es de 25 %.

Fig. 2.23 Motor de gasolina

Otro ciclo importante es el llamado ciclo Diesel para los motores de petróleo. En la figura 2.24 se representa el reversible ideal.



Donde, comenzando en 1:
 1-A: admisión a presión constante.
 A-B: compresión adiabática del aire.
 B-C: inyección del combustible en el aire calentado en AB
 C-D: expansión adiabática
 D-A: desprendimiento de calor a volumen constante

Fig. 2.24 Motor de petróleo

Las primeras máquinas térmicas tenían una eficiencia inferior al 5 %, razón por la cual demandaban grandes cantidades de combustible, este

inconveniente indujo a realizar profundos estudios sobre su funcionamiento para encontrar ciclos de trabajo cada vez más eficientes.

Teniendo en cuenta que todos los motores térmicos reales tienen en común que son irreversibles y que funcionan entre dos temperaturas solamente, ¿cuál será el ciclo más eficiente? La respuesta a esta pregunta la dio por vez primera, a la edad de 28 años el ingeniero francés Sadi Carnot en un trabajo cuya redacción se remonta al 1824.

En su trabajo Carnot demostró que, si el ciclo es ideal reversible y que para cerrarlo entre las dos isotermas se emplean dos curvas adiabáticas, la eficiencia de la máquina toma su máximo valor debido a que se transforma en trabajo la mayor cantidad de energía proveniente del foco caliente, independientemente de la sustancia de trabajo usada y(o) de otros factores. En el ciclo reversible de Carnot la eficiencia solo depende de la diferencia de temperatura entre los focos calientes y fríos (a mayor valor de $T_1 - T_2$ mayor eficiencia). El ciclo de Carnot se representa en la figura 2.25.

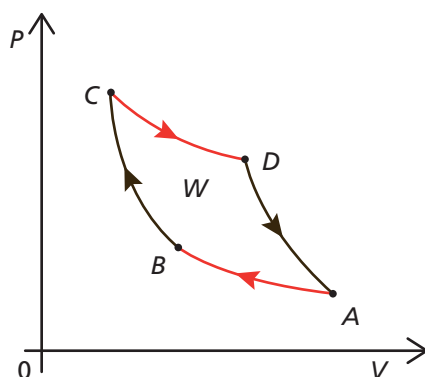


Fig. 2.25 Ciclo de Carnot

Donde AB y CD son isotermas, siendo BC y DA curvas adiabáticas.

Si el ciclo se recorre en sentido antihorario corresponde a una máquina refrigerante funcionando con la mayor eficiencia.

Para el ciclo irreversible de Carnot se demuestra que la razón matemática entre la cantidad de calor intercambiada con cada foco y su temperatura tiene igual módulo para ambas isotermas (aunque difieren en el signo). Si del foco caliente se absorbe una cantidad de energía Q_1 a la temperatura T_1 y se entrega Q_2 a la temperatura T_2 que tiene el foco frío.

$$\frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$

Despejando Q_2 y sustituyendo en 2.26, queda que:

$$\eta = 1,0 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad 2.29$$

La ecuación 2.29 solo es válida para el ciclo ideal reversible de Carnot a diferencia de la ecuación 2.26 que es aplicable a cualquier ciclo.

De la ecuación 2.29 se infiere que en el ciclo de Carnot la eficiencia solo depende de las temperaturas T_1 y T_2 aumentando en la medida que T_1 es mayor y(o) T_2 es menor.

Para las máquinas refrigerantes que cumplen con el ciclo reversible de Carnot.

$$k = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad 2.30$$

donde T_2 es la temperatura del foco frío.

Basado en su máquina térmica reversible ideal Carnot formuló el siguiente teorema general aplicable a todas las máquinas.

La eficiencia de cualquier máquina térmica que opere entre dos temperaturas nunca será superior a la de una máquina Carnot que funcione entre esas mismas temperaturas.

Este teorema significa que el límite superior de eficiencia corresponde a la máquina que funcione con el ciclo ideal reversible de Carnot.

Problema resuelto 2.8

Una máquina térmica toma una cantidad de calor de 14 332 J de un foco caliente y devuelve al ambiente 12 512 J. Calcula el trabajo realizado por la máquina y su eficiencia.

Solución:

El trabajo realizado por la máquina será igual a la diferencia entre la energía tomada del foco caliente (Q_1) y la entregada al foco frío (Q_2):

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$W = 14\,332\text{ J} - 12\,512\text{ J}$$

$$W = 1\,820\text{ J}$$

La eficiencia de la maquina está dada por:

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

$$\eta = \frac{1\,820\text{ J}}{14\,332\text{ J}}$$

$$\eta = 0,126$$

$$\eta = 12,6\%$$

Hora del laboratorio

Práctica de laboratorio 2.2

Determinación del calor específico de una sustancia

Objetivo. Determinar el calor específico a partir del equilibrio térmico.

Materiales. Cuerpo metálico (se recomienda tomar el de cobre del conjunto para experimentos mecánicos), 200 g de agua (calor específico del agua $C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$), termómetro o sensor de temperatura, fuente calor (para calentar el agua aproximadamente hasta 50 °C), recipiente

para el agua, calorímetro. Nota, es muy importante determinar la temperatura t_f en el momento exacto que se establece el equilibrio.

Usted puede utilizar la ecuación $C_{\text{cu}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} (t_f - t_{\text{H}_2\text{O}})}{m_{\text{Cu}} (t_f - t_{\text{Cu}})}$, donde $m_{\text{H}_2\text{O}}$ es

la masa del agua, m_{Cu} es la masa del cobre, $t_{\text{H}_2\text{O}}$ es la temperatura inicial de agua, t_{Cu} es la temperatura inicial del agua caliente y t_f es la temperatura final en el estado de equilibrio.

Comprueba tus conocimientos

52. ¿Qué procesos se llaman irreversibles?
53. Cita ejemplos de los procesos irreversibles más típicos.
54. Enuncia la segunda ley (o principio) de la termodinámica.
55. Si los ríos corrieran hacia atrás, ¿sería esto una infracción de la ley de conservación de la energía?
56. ¿Qué máquina recibe el nombre de motor térmico?
57. ¿Qué función desempeñan en un motor térmico el foco caliente, el foco frío y la sustancia de trabajo (o agente de transformación)?

58. ¿A qué se denomina el rendimiento de un motor térmico?
59. ¿A qué es igual el valor máximo posible del rendimiento de un motor térmico?

Tareas generales del capítulo

1. Cita dos propiedades de los gases que demuestren la existencia del movimiento molecular.
2. Si en un recipiente cerrado que tiene un volumen fijo, una temperatura fija y cierta cantidad de gas, se inyecta una nueva cantidad del mismo gas, la presión aumenta, y si se extrae gas, la presión disminuye. Explica este hecho desde el punto de vista de la teoría cinético molecular.
3. Si dos cuerpos cualesquiera que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto, siempre fluye calor del cuerpo más caliente al cuerpo más frío. ¿Cómo se explicaría este fenómeno, según la teoría cinético-molecular?
4. Determina la cantidad de sustancia y el número de moléculas de un compuesto cuya masa es de 0,352 kg si su masa molar es de 0,044 kg/mol.
5. Calcula la presión de un gas ideal monoatómico contenido en un recipiente si la cantidad de partículas en unidad de volumen es de $2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y su energía cinética media es de $6,0 \cdot 10^{-15} \text{ J}$.
6. Si se conoce que la densidad del helio es $\rho_{\text{He}} \approx 0,18 \text{ kg/m}^3$, determina la concentración de este, n_0 , en condiciones normales.
7. ¿Qué presión ejerce sobre las paredes de un recipiente un gas ideal con una concentración de $1,0 \cdot 10^5 / \text{mm}^3$, si poseen una velocidad media cuadrática de 1,0 km/s, si la masa de una molécula es $3,0 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$?
8. Considerando al aire como un gas ideal. Estima la velocidad media del movimiento térmico de sus moléculas. En condiciones normales, si en estas condiciones la presión es $P \approx 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, la densidad del aire $\rho \approx 1,3 \text{ kg/m}^3$.
9. Determina la energía cinética media de un gas ideal a temperatura de 27 °C.
10. En un balón de volumen 30 dm³ se encuentra hidrógeno a una presión de $5,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ con una temperatura de 27 °C. Determina la masa del gas considerando que este es ideal.
11. Se comprimen $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ de un gas ideal monoatómico a 10 °C y presión $1,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (presión atmosférica normal) hasta que su volumen se reduce a $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, permaneciendo constante la temperatura.
 - a) ¿Cuál es la nueva presión del gas?
 - b) Representa la situación descrita en diagramas de $P = f(V)$, $P = f(T)$ y $V = f(T)$.

- 12.** La temperatura de un gas ideal aumenta de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, permaneciendo constante la presión a $1,01 \cdot 10^5\text{ N/m}^2$. Si el volumen inicial del gas en el recipiente es de $2,0 \cdot 10^{-2}\text{ m}^3$:
- ¿Qué nuevo volumen ocupa el gas en el recipiente?
 - Representa la situación descrita en diagramas de $P = f(V)$, $P = f(T)$ y $V = f(T)$.
- 13.** La presión de $0,03\text{ mol}$ de un gas ideal, en un matraz, es de $3,0 \cdot 10^5\text{ Pa}$ a $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, si la presión se reduce a la mitad, sin variar el volumen:
- ¿Qué temperatura se establece dentro del matraz?
 - Calcula el volumen del gas.
 - Representa la situación descrita en diagramas de $P = f(V)$, $P = f(T)$ y $V = f(T)$.
 - ¿Cuántos gramos de oxígeno hay en el recipiente? ¿Cuántas moléculas de oxígeno hay en el recipiente?
- 14.** Un gas ideal se encuentra a una temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un balón. ¿Cuál será su temperatura si su presión se reduce en un 30% , sin variar el volumen?
- 15.** La gráfica (figura 2.26) representada muestra el ciclo experimentado, por una muestra de gas ideal monoatómico.

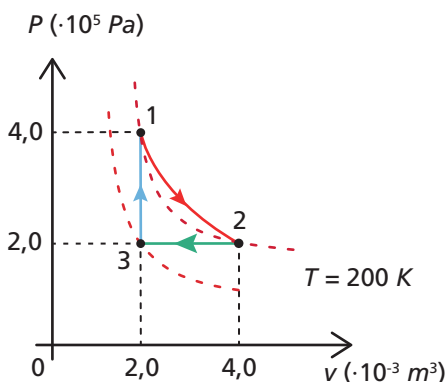


Fig. 2.26

- Identifica los procesos y explícalos según la teoría cinético-molecular.
- Calcula el número de moles del gas.
- Determina la temperatura del gas en el estado 3.
- Transforma este plano de $P = f(V)$ en otros de $P = f(T)$ y $V = f(T)$.

16. En la figura 2.27 se representa la transformación reversible ABC experimentada por determinada muestra de gas ideal monoatómico. Si se conoce que el tramo curvo BC representa un proceso mediante el cual el sistema no varía su temperatura y la temperatura en el estado A es 100 K.

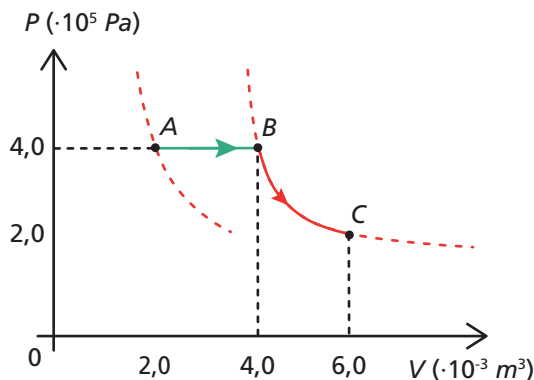


Fig. 2.27

- Identifica cada proceso. Explica cada uno según la teoría cinético-molecular.
 - Determina el trabajo realizado en el proceso $A-B$.
 - ¿Qué valor tiene la temperatura del gas en el estado B ?
 - ¿En el proceso $B-C$ el gas absorbió o cedió calor? Explica.
 - ¿Con cuántos moles de gas se trabajó?
 - Representa en tu libreta un proceso a volumen constante que aumente la presión hasta igualarse a la inicial.
17. Una muestra de gas ideal monoatómico se somete al ciclo de transformaciones que se representa en el diagrama $P = f(T)$, de la figura 2.28. El volumen del gas en el estado 1 es $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

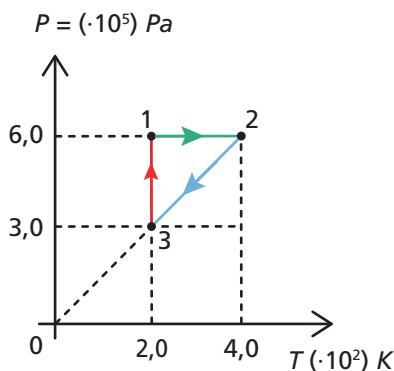


Fig. 2.28

- Identifica cada uno de los procesos a los que fue sometido el gas. Explica cada uno según la teoría cinético-molecular.
 - ¿Qué valor tiene el volumen del gas en el estado 3? Explica.
 - ¿Cuántas moléculas contiene el gas?
 - En el proceso 1–2 el trabajo es realizado por el gas o sobre él. Justifica tu respuesta.
 - Transforma la gráfica en planos termodinámicos de $P = f(V)$ y $V = f(T)$.
- 18.** Tres moles de gas ideal monoatómico ocupan un volumen de $8,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, la temperatura es de 300 K. Si se expanden a presión constante hasta que su temperatura es de 450 K. Determina:
- El trabajo realizado.
 - La presión final.
 - El volumen final.
 - La cantidad de calor intercambiada.
 - Representa esta transformación en un plano $P = f(V)$, $P = f(T)$ y $V = f(T)$.
- 19.** De cada una de los procesos representados en los planos termodinámicos (figura 2.29):

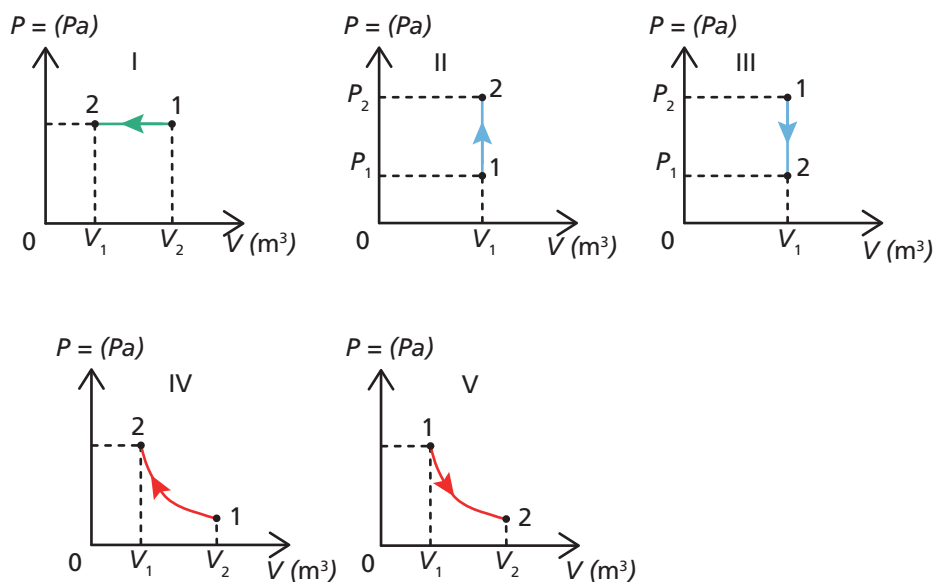


Fig. 2.29

- Identifica el tipo de proceso termodinámico de cada gráfica. Justifica según la teoría cinético molecular.

- b) Di si la cantidad de calor es cedido o absorbido.
- c) Di si el trabajo es realizado por el sistema o sobre el sistema.
- d) Señala el signo que posee la variación de la energía interna.

20. Se hace que un sistema termodinámico pase de un estado inicial A hasta otro estado B y regrese de nuevo al A, pero pasando por el estado C, como lo muestra la trayectoria ABCA del diagrama (figura 2.30) $P = f(V)$ de la figura.

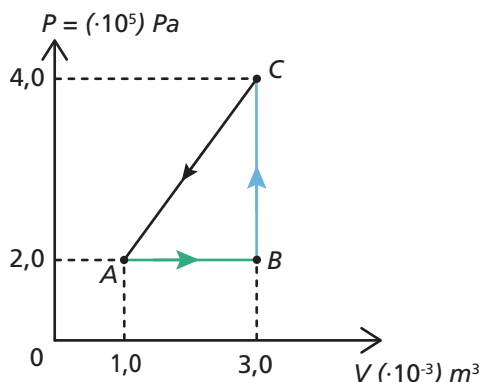


Fig. 2.30

- a) Completa la tabla de la figura con los signos "+" o "-" adecuados a los signos de las cantidades termodinámicas asociadas con cada proceso.
- b) Calcula el valor numérico del trabajo efectuado por el sistema en un ciclo ABC.
- c) Para 1,0 mol de este gas calcula la cantidad de calor asociada al cambio BC.

	Q	W	ΔU
AB			
BC			
CD			

21. Un gas perfecto es sometido a los siguientes procesos:

- Se comprime isobáricamente hasta que su volumen disminuye 3 veces;
- A volumen constante la presión disminuye a la mitad;
- Se expande a presión constante hasta el volumen inicial;
- Retorna sin variar el volumen a las condiciones iniciales.

a) Construye los planos termodinámicos de:

$$P = f(V), P = f(T) \text{ y } V = f(T).$$

b) ¿En cuál de los procesos representados el gas realiza trabajo?

c) ¿En cuál de los procesos el gas desprende calor?

d) ¿En cuál de los procesos la energía interna del gas aumenta?

- 22.** Un sistema constituido por 0,20 mol de gas ideal monoatómico es sometido al ciclo que se muestra en la figura 2.31. El proceso B–C es isotérmico y el proceso C–A transcurre sin que el gas intercambie calor con el medio. La cantidad de calor intercambiada en el ciclo es de $-2,8 \cdot 10^2 \text{ J}$.

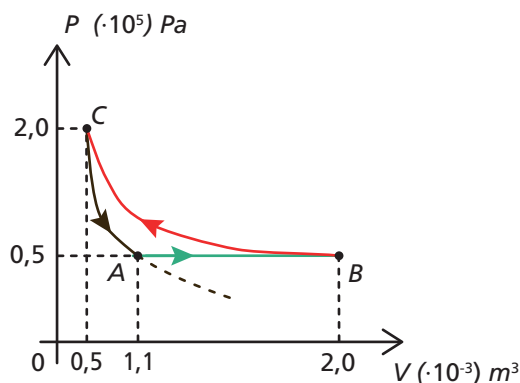


Fig. 2.31

a) Calcula la temperatura máxima alcanzada por el gas en el ciclo.

b) Determina la variación de la energía interna en el proceso C–A. En este caso la energía interna ¿aumenta o disminuye? Justifica.

c) Determina la cantidad de calor intercambiada en el proceso B–C. ¿Esta es absorbida o cedida por el gas? Justifica.

- 23.** Un gas ideal absorbe 4 000 cal isotérmicamente.

a) ¿Se expandirá o comprimirá? Explica tu respuesta.

b) ¿Qué trabajo habrá realizado? ¿Será por el gas o sobre él? Explica tu respuesta.

- 24.** Un gas absorbe a temperatura constante 400 J en forma de calor.

a) Escribe la ecuación de la primera ley de la termodinámica para este proceso termodinámico.

b) Di si el trabajo realizado en este proceso es de: 400 J; 200 J; 100 J o 0 J.

c) Si el trabajo se realizara sin intercambio de calor con el medio, ¿cómo se denomina y cuál es la ecuación de la variación de energía interna en este caso?

25. Una muestra de gas ideal monoatómico contenida en un recipiente, ha sido sometida a un ciclo de transformaciones formado por tres procesos, tal como se muestra en el diagrama $P = (f)V$ de la figura 2.32. Se conoce que la temperatura del gas en el estado 1 es de 200 K y que para realizar la transición 2-3 el sistema fue aislado térmicamente del medio exterior:

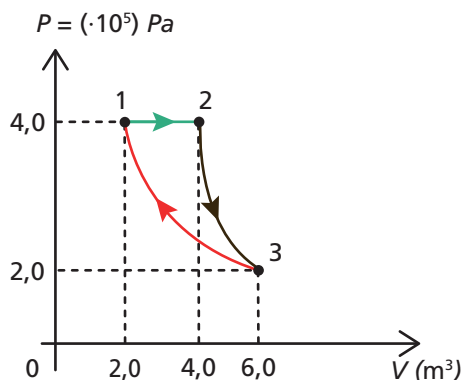


Fig. 2.32

- Identifica cada uno de los procesos a los que fue sometido el gas. Justifícalos.
 - ¿Qué valor tiene la temperatura en el estado 2?
 - Plantea la ecuación del primer principio de la termodinámica y aplícala a cada proceso.
 - ¿Qué valor tiene la variación de la energía interna en el proceso 3-1? Explica.
26. Analiza los siguientes planteamientos y di si son verdaderos o falsos. Explica en el caso de los falsos.
- La temperatura caracteriza la medida de la energía cinética media de las moléculas de un gas.
 - La ley de Boyle – Mariotte plantea que, en un proceso a temperatura constante la presión y el volumen son directamente proporcionales.
 - La primera ley de la termodinámica establece que la cantidad de calor recibida o desprendida por un sistema se utiliza en realizar trabajo y variar su energía interna.

- 113

- d) En una expansión isocórica todo el calor se emplea en variar la energía interna y realizar trabajo sobre el sistema.
- e) Uno de los postulados de la teoría cinético-molecular plantea que el movimiento de las moléculas es caótico y desordenado.
- 31.** Un mole de gas ideal monoatómico realiza un trabajo de 10^4 J durante un proceso sin intercambio de calor con el medio ambiente exterior. ¿Qué valor tiene la variación de la temperatura? ¿Aumenta o disminuye?
- 32.** Una masa de gas carbónico de 300 g se encuentra en un cilindro al que se le ha acoplado un pistón que puede moverse libremente sin rozamiento, si el gas se calienta desde la temperatura de 20°C hasta los 110°C , a una presión atmosférica constante. ¿Qué trabajo realiza el gas durante el calentamiento? $M_c = 0,012$ kg (masa molar)
- 33.** Para duplicar el volumen de una muestra de 10 mol de gas ideal monoatómico se pone en contacto con una fuente de calor de la cual absorbe reversiblemente $1,30 \cdot 10^3$ J a presión atmosférica constante. Calcula:
- La variación que experimentó la temperatura del gas.
 - La variación que experimentó la energía interna del gas.
- 34.** Toma una llave de vidrio, de las que tienes en el laboratorio de Química (figura 2.33). Con la llave cerrada, conecta por un extremo un globo inflado y por el otro extremo, otro globo inflado, pero con menor cantidad de aire. Al abrir la llave ¿quién infla a quién, el globo grande al chiquito o viceversa? ¿A qué se debe este resultado?

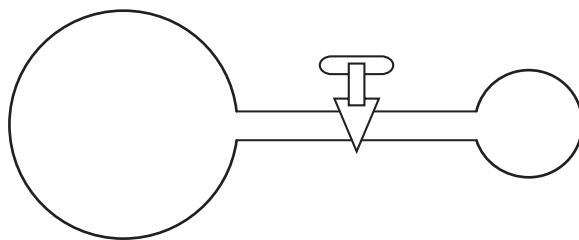


Fig. 2.33

CAPÍTULO 3

Electrostática

El término electricidad es muy familiar para la mayoría de las personas. Esto se debe a que la electricidad está presente en todas partes, tanto en el mundo natural como en el mundo construido. De hecho, no se exagera cuando se dice que esta es la era de la electricidad.

Por su importancia científica, tecnológica y en la vida cotidiana en general, vale decir sociocultural, el conocimiento básico de los fenómenos eléctricos (y magnéticos) resulta relevante para todas las personas.



Fig. 3.1 Ejemplo de manifestaciones de los fenómenos electrostáticos:
a) en la vida cotidiana; b) en la técnica

En este capítulo ampliaremos y profundizaremos en el estudio de los llamados fenómenos electrostáticos. En los siguientes abordaremos los relacionados con la corriente eléctrica, los fenómenos magnéticos y la indisoluble relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. En general, a todos estos fenómenos se les conoce como electromagnéticos.

El caso particular de los llamados fenómenos electrostáticos (recordemos, los relacionados con los cuerpos cargados en reposo) tiene una gran importancia como base para el estudio de los fenómenos electromagnéticos y por sus aplicaciones prácticas.

3.1 Carga eléctrica

Seguro recuerdas, de lo estudiado en grados anteriores, que el fenómeno de electrización de los cuerpos se puede evidenciar de forma sencilla, incluso, mediante algunos “experimentos caseros”.

Por ejemplo, si se acerca un trozo de tubo plástico, previamente frotado con un paño, a un delgado chorro de agua, el chorro se desvía de su dirección vertical (figura 3.2).

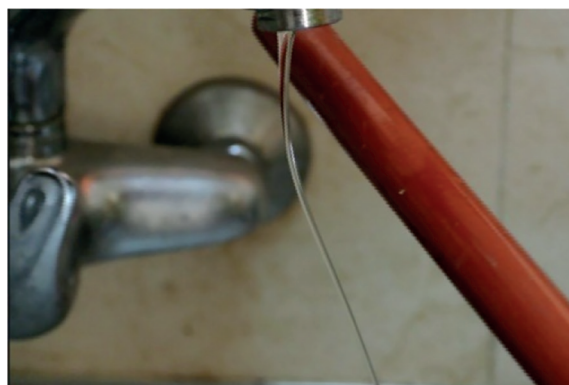


Fig. 3.2

También, si acercamos el pedazo de tubo a nuestro brazo, podemos observar cómo los vellos son atraídos, y lo mismo sucede si acercamos el tubo a pequeños trocitos de papel.

En la Grecia antigua se conocía que al frotar con lana un trozo de resina vegetal fósil (ámbar), que los griegos llamaban *ἤλεκτρον* (*ἤλεκτρον*), esta adquiría la propiedad de atraer pedazos ligeros de otros materiales.

Ya en el siglo VII de antes de nuestra era (a.n.e.) el filósofo griego Tales de Mileto describió esta propiedad del ámbar y más tarde, otro griego, Teofrasto (310 a.n.e), realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir este tipo de fenómeno y escribió un tratado al respecto.

Mucho más tarde, a finales del siglo XVI, el médico inglés William Gilbert, que trabajó en la corte de la reina Isabel de Inglaterra, precisamente en la época en que Shakespeare escribía *Hamlet*, se interesó por el fenómeno descrito por Tales de Mileto y estableció que muchas sustancias como, por ejemplo, el vidrio, el lacre y el azufre, se comportaban como el ámbar y denominó a este fenómeno **electrización**. Presumiblemente, así se introdujo en la ciencia la palabra **electricidad**.

Posteriormente, en los trabajos del científico francés Francois de Cisternay du Fay, publicados en 1733 y 1734, se plantea la existencia de dos tipos de electricidad: vidriosa y resinosa (después se les llamó positiva y negativa respectivamente). Él frotó con tela de seda dos tubos de vidrio iguales; al acercar los tubos vio que siempre se repelían, pero si acercaba al tubo de vidrio frotado con seda un pedazo de hule (o resina) frotado con cuero, entonces se atraían.

Por otra parte, Benjamín Franklin (1706-1790), político, escritor y científico norteamericano, creó un modelo para explicar la electrización, en el cual un solo fluido eléctrico era transferido entre los cuerpos. En este modelo, el vidrio electrizado adquiere un exceso de fluido eléctrico sobre la cantidad normal y le llamó a este estado “positivo” (+); el objeto con el cual el vidrio fue frotado adquiere una deficiencia de fluido eléctrico y le llamó “negativo” (-) a su estado. La terminología de Franklin, no la de Du Fay, es la que permanece hoy, aunque su modelo fue superado, desde 1881, por la hipótesis del fisiólogo y físico alemán G. Helmholtz que explicaba los fenómenos eléctricos por la existencia de partículas elementales electrizadas (cargadas).

La hipótesis de que los fenómenos relacionados con la electrización de los cuerpos se debían a la existencia de partículas electrizadas o cargadas (como también se les denominó) fue confirmada cuando se descubrió la existencia del electrón en 1887 por el científico británico Joseph J. Thompson y del protón en 1919, por el también científico británico Ernest Rutherford.



De la historia

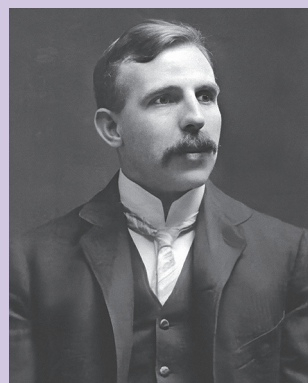
Científico británico. Además de descubrir la existencia del electrón, de los isótopos e inventar el espectrómetro fue el autor de la propuesta del modelo en que los átomos se consideraban como una distribución esférica de carga en la que se encontraban embebidos los electrones.

En 1906 fue galardonado con el premio Nobel de Física "en reconocimiento de los grandes méritos de sus investigaciones teóricas y experimentales en la conducción de la electricidad generada por los gases"



Fig. 3.3 Joseph J. Thompson, 1856-1940

Se dedicó al estudio de las partículas radiactivas y logró clasificarlas en alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Halló que la radiactividad iba acompañada por una desintegración de los elementos, lo que le valió ganar un premio nobel de Química en 1908. Propuso un modelo atómico (*modelo planetario o modelo de Rutherford*), en el que toda la carga positiva y casi toda la masa del átomo se reúne en un núcleo central alrededor del cual giran los electrones.



La carga eléctrica es, en esencia, una propiedad de los electrones y de otras partículas del micromundo, que se manifiesta mediante lo que se denomina, en general, interacción electromagnética.

La cantidad o magnitud física que mide esta propiedad también se denomina carga eléctrica y su unidad en el SI es el **coulomb (C)**.

En el SI, el coulomb se define en función de la unidad de intensidad de corriente eléctrica, el amperio (A), que es una unidad fundamental.

Un coulomb es la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor durante un segundo, cuando la intensidad de la corriente que circula por este es de un amperio.

Cabe insistir en el hecho de que, cuando solo se tiene en cuenta el caso de sistemas en reposo se tiene un caso particular de interacción electromagnética: la interacción **electrostática**.

Los experimentos demuestran que las fuerzas de interacción electrostática entre dos electrones o entre dos protones son de repulsión y entre un electrón y un protón son de atracción. Por otra parte, estas fuerzas son mucho mayores que las fuerzas gravitatorias que se ejercen entre estas partículas. Estas son dos importantes diferencias entre las interacciones electromagnéticas y las gravitatorias, que son siempre de atracción.

El fenómeno de electrización de los cuerpos puede explicarse a partir de nuestro conocimiento de que las partículas que constituyen los cuerpos, los átomos, están formados, a su vez, por electrones, protones y neutrones: al poner en contacto mutuo dos cuerpos de materiales diferentes pueden pasar electrones de uno a otro, quedando electrizados ambos. Lo anterior puede suceder porque existen materiales que tienen unos electrones débilmente ligados al núcleo y tienen tendencia a perderlos mientras que otros materiales tienen tendencia a ganarlos.

Puede resultar conveniente precisar que no es indispensable frotar dos cuerpos entre sí para que se transfieran electrones de uno a otro, basta con que hagan buen contacto y sean de distintos materiales. Con el frotamiento lo que se hace en realidad es propiciar un buen contacto entre los cuerpos.

Este fenómeno es conocido como triboelectricidad y da como resultado que uno de los objetos que se han puesto en contacto quede cargado positivamente (pues cede electrones) mientras el otro se carga negativamente (adquiere electrones). La polaridad y la cantidad de la carga neta que queda en cada material cuando se separan dependerá de sus posiciones relativas en la serie triboeléctrica (una lista que clasifica los materiales en función de su polaridad y su capacidad de adquirir carga). El efecto triboeléctrico es la causa principal de la electricidad estática que observamos en nuestra vida diaria e incluye la que se produce por rozamiento de diferentes materiales.

En los experimentos sobre electrización también se destaca el hecho de que hay materiales que retienen la “carga eléctrica” adquirida en la parte de la superficie electrizada, como en el caso los plásticos, el vidrio, el ámbar, las telas, el papel, el agua (químicamente pura) y otros. Como sabemos, estos materiales son llamados **aislantes** o **dieléctricos**.

Por otra parte, en el caso de materiales en que la “carga adquirida” se distribuye por toda la superficie del cuerpo y no es posible electrizarlos si no se agarran con un mango de material aislante para impedir que la “carga” se distribuya también por nuestro cuerpo y pase a la superficie de la Tierra. Recordemos que a este tipo de materiales se les denomina conductores. Todos los metales pertenecen a este tipo de materiales, también los líquidos y gases, si están ionizados, son **conductores**.

Las comillas utilizadas en el párrafo anterior tienen la intención de llamar la atención sobre el hecho de que no se debe olvidar que esta es una forma simplificada de expresar que los cuerpos han cedido o adquirido electrones y en consecuencia quedan electrizados o cargados.

Hay otro tipo de materiales como el silicio, el germanio, el selenio y el grafito que ocupan una posición intermedia y se denomina semiconductores. En estos materiales la conductividad depende mucho de las influencias externas, en especial de la temperatura y de la presencia de impurezas.

Todos estos materiales tienen un gran número de aplicaciones prácticas y posteriormente se profundizará en su conocimiento.

Propiedades de la carga eléctrica

Carácter discreto o cuantizado

La carga eléctrica mínima es la que poseen los electrones, los protones y otras partículas subatómicas; su valor absoluto es $1,602\ 006 \cdot 10^{-19}$ C y se representa por la letra e. Entonces, de manera simbólica, para los electrones la carga sería $-e$ y para los protones $+e$. Hay partículas, como los neutrones, que no poseen carga eléctrica neta.

Cuando una cantidad característica de una propiedad, como la carga eléctrica, se presenta en múltiplos definidos de un cierto valor, se dice que tiene un carácter discreto o que esta cuantizada.

Como la magnitud de la carga de un cuerpo depende del defecto o exceso de electrones, esta será siempre un número entero de veces e:

$$q = ne \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4 \quad 3.1$$

Hoy se conoce de otras partículas que poseen una fracción de la carga del electrón. Estas partículas se llaman **quarks** y forman parte del protón, el neutrón y otras partículas.

Conservación

En un sistema aislado, la suma algebraica de las cargas de todas las partículas permanece constante. Este hecho se conoce como **ley de conservación de la carga eléctrica**.

Invarianza

Esta propiedad consiste en que la carga eléctrica de un cuerpo o partícula es independiente de la velocidad con que dicho cuerpo o partícula se mueve, es decir, no depende del sistema de referencia desde el que se mide.

Aditividad

La carga total de un cuerpo es la suma de todas las cantidades de cargas parciales que adquiere, es decir:

$$q_t = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad 3.2$$



De la historia

La carga de un electrón fue medida por primera vez por el físico estadounidense Robert Millikan (figura 3.5) entre 1909 y 1913.

En su experimento roció gotas muy pequeñas de aceite en el espacio entre dos placas paralelas en posición horizontal separadas por una distancia d . Entre las placas se establece un campo electrostático, en dirección vertical y hacia abajo, aplicando una diferencia de potencial U .

Al variar la diferencia de potencial U es posible mantener algunas gotas (previamente ionizadas) en reposo y así determinar el valor de su carga eléctrica.



Fig. 3.5



Saber más

Ampliemos ahora lo estudiado en grados anteriores sobre el fenómeno de la electrización por inducción.

Al acercar una barra de plástico o vidrio, previamente cargada, a una esfera ligera con una capa metálica no cargada (figura 3.6) o a pequeños pedazos de papel, tanto la esfera como los papelitos son atraídos por la barra, sin necesidad de tocarlos directamente. ¿Por qué ocurre dicha atracción electrostática?

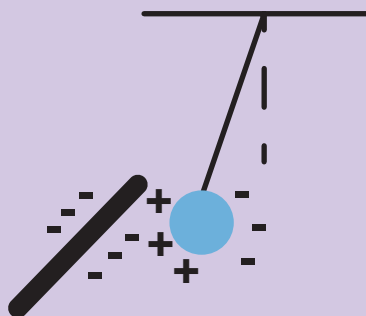


Fig. 3.6 Bajo la influencia de la barra cargada en la parte más cercana a la barra hay un déficit de electrones, es decir, queda cargada positivamente

En el caso del cuerpo recubierto con la capa metálica, los electrones, que pueden moverse libremente, son repelidos por la carga negativa de la barra dejando el lado próximo a la barra con un exceso de carga positiva. Esto da como resultado una fuerza atractiva neta hacia la barra. El desplazamiento de los centros efectivos de cargas positiva y negativa se llama "polarización inducida".

Haciendo uso de la polarización inducida puede llegarse a cargar conductores. Esto se muestra de forma esquemática en la figura 3.7 (este fenómeno se llama carga por inducción o electrización por influencia y fue descubierta por el físico alemán Franz Aepinus, al cual se le atribuye además el postulado de que las cargas negativas se repelen entre sí, postulado que no formaba parte de la teoría original de Franklin).

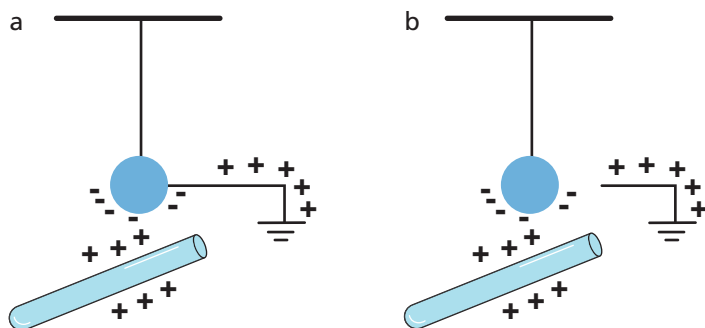


Fig. 3.7 a) sistema esfera-Tierra que se encuentra bajo polarización inducida; b) la conexión a Tierra es rota y la esfera conductora se queda con una carga neta negativa

Sin embargo, cuando son atraídos los papelitos no puede utilizarse la misma explicación ya descrita con la esfera metálica que es conductora de

la electricidad, porque en estos las cargas no son libres de moverse al no ser el papel un conductor de la electricidad.

En este caso (figura 3.8 a), las moléculas que forman la estructura son eléctricamente neutras (dipolos eléctricos). En estado normal los dipolos se mueven y están orientados al azar, de manera tal que el efecto de un dipolo es cancelado por el de sus vecinos.

En presencia de la barra cargada negativamente (figura 3.8 b), en promedio, los dipolos son girados con los extremos positivos hacia la barra. Los centros efectivos de carga positiva y negativa son desplazados, con el lado izquierdo cargado positivamente respecto al derecho, así se produce la atracción.



Fig. 3.8 Modelo simplificado para ilustrar el proceso de atracción de un material aislante por un cuerpo cargado

Comprueba tus conocimientos

1. Sobre la electrización de los cuerpos responde:
 - a) ¿Cómo se puede determinar si un cuerpo se ha electrizado?
 - b) ¿Cuántos tipos de carga eléctrica pueden adquirir los cuerpos?
¿Cómo se denominan?
 - c) Las partículas cargadas ¿se atraen o se repelen?
 - d) Explica por qué el ámbar se carga negativamente al frotarlo con cuero. ¿se cargará el cuero? Argumenta tu respuesta.
2. A continuación, te ofrecemos dos planteamientos, uno de ellos es incorrecto. Determina cuál de ellos es el correcto y explica el porqué de tu elección. Considera $|e| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

La carga eléctrica de determinada partícula electrizada es $8,01 \cdot 10^{-20} \text{ C}$

- a) Una partícula electrizada posee una carga eléctrica de $48,06 \cdot 10^{-20} \text{ C}$

3. Se tienen cuatro pequeños cuerpos esféricos (A, B, C, D) cargados eléctricamente. El cuerpo A repele al B, al mismo tiempo que el A atrae al C y este último repele al D. Si se conoce que la carga eléctrica de la esfera D es positiva ¿Qué tipo de carga eléctrica posee B? Justifica
4. ¿Deben eliminarse todas las cargas negativas para conseguir que una varilla se cargue positivamente? Explica tu respuesta.

3.2 Ley de Coulomb

Conocemos, que los cuerpos cargados con carga de igual signo se repelen y con carga de diferente signo se atraen, pero:

¿De qué factores depende el valor la fuerza que se ejerce entre los cuerpos cargados?

La respuesta a esta pregunta fue dada, en 1785 por el **físico francés** Charles Coulomb (figura 3.9), por vía experimental. A estos efectos Coulomb utilizó una balanza de torsión adecuada a este fin.



Fig. 3.9 Charles Agustín Coulomb (1736-1806)

En esencia, esta balanza (figura 3.10) consiste en un fino alambre elástico que sostiene una varilla de vidrio que tiene, en uno de sus extremos, una esfera metálica B y, en el otro, un contrapeso C. Otra esferita metálica A está sujeta a la tapa de la balanza.

Si las esferitas metálicas A y B son cargadas con carga de igual signo, se repelen y hacen girar la varilla horizontal hasta una nueva posición, donde la fuerza electrostática equilibra a la fuerza ejercida por la torsión del

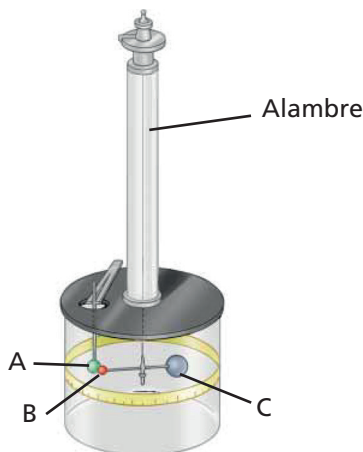


Fig. 3.10 Representación esquemática de una balanza de torsión

Coulomb, a pesar de la poca exactitud de sus experimentos, logra establecer esta dependencia, que posteriormente ha sido confirmada con una gran precisión.

Dicha dependencia, que se conoce con el nombre de **Ley de Coulomb**, establece lo siguiente:

El módulo de las fuerzas entre dos cuerpos cargados, que puedan ser considerados puntales, en reposo y en el vacío, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa y directamente proporcional al producto de los módulos de la magnitud de sus cargas. Estas fuerzas actúan a lo largo de la línea que los une y tienen sentidos contrarios. Si los cuerpos tienen carga del mismo signo se repelen y si tienen carga de signo opuestos se atraen (figura 3.11).

Simbólicamente, para los módulos de las fuerzas:

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{(r_{12})^2} \quad 3.3$$

En el SI, si los cuerpos se suponen en el vacío, la constante k tiene el valor

$$k = 8,987\,551\,787\,368\,176\,4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2.$$

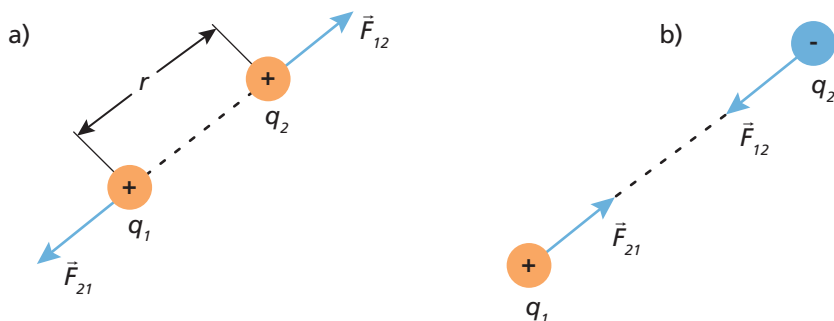


Fig. 3.11 a) Las cargas de los cuerpos son del mismo signo. Igual sería la situación si las dos fueran de signo negativo; b) Las cargas de los cuerpos son de signo contrario

Nota que el valor de k significa que el módulo de la fuerza entre dos cuerpos puntuales, cuya carga sea de $1,0 \text{ C}$ y estén separados una distancia de $1,0 \text{ m}$, es de aproximadamente $9,0 \cdot 10^9 \text{ N}$. Esta sería una fuerza de enorme valor, por ejemplo, para que un cuerpo tenga un **peso** de este valor, sobre la superficie de Tierra, tendría que tener aproximadamente una masa de novecientos millones de kilogramos. Un coulomb es una carga muy grande y por eso son muy empleadas las unidades derivadas como el **microcoulomb** ($1,0 \mu\text{C} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$).

Debe notarse que la ley es aplicable de manera exacta solo en el caso del modelo en que los cuerpos cargados puedan ser considerados puntuales. Por supuesto, ya esto nos resulta no solo algo familiar sino claro: para poder precisar la posición de un cuerpo hay que considerar el modelo que ya conocemos del "cuerpo puntual". En una primera aproximación sabemos que el modelo funcionará bien si la distancia entre los cuerpos permite no considerar las dimensiones lineales de los estos.

También es importante tener presente que la ley es solo válida respecto a un sistema de referencia en el cual los cuerpos cargados están en reposo.

Se puede demostrar que la ecuación también es válida para distribuciones de cargas esféricas y uniformes, aunque no sean puntuales. En este caso, la distancia sería la distancia entre los centros de los cuerpos cargados.

Puede ser conveniente comentar que esta ley puede ser deducida teóricamente y que la constante k se puede expresar como:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Donde $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, se denomina **permitividad del vacío**.

provocar un incendio. Para prevenir las descargas electrostáticas deben conectarse a tierra los contenedores (figura 3.13) y los operarios. Existen dispositivos que se utilizan con este fin tal como pinzas de puesta a tierra para camiones o las muñequeras de puesta a tierra para operarios.

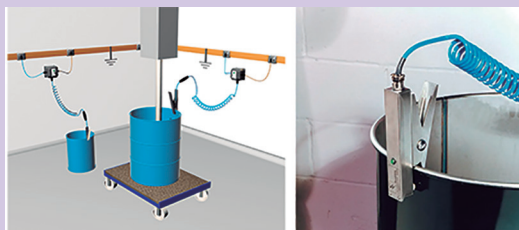


Fig. 3.13

4. El precipitador electrostático es un dispositivo que se utiliza para atrapar partículas atrayéndolas por una carga electrostática inducida.
5. Los rociadores electrostáticos que se utilizan en la agricultura para el control eficaz de plagas, en la medicina para la esterilización del material quirúrgico y el personal y determinados procesos de pintura. (figura 3.14)



Fig. 3.14

Problema resuelto 3.1

Se tienen dos partículas cargadas eléctricamente en reposo y en el vacío separadas una distancia de 3,0 cm, como se muestra en la figura 3.15. El valor de la carga de la primera partícula es $-2,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ y el de la segunda partícula $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$. Calcula el valor de la fuerza electrostática entre las partículas y represéntalas.

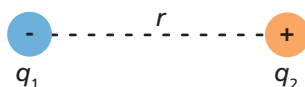


Fig. 3.15

Solución:

En este caso, dada la situación planteada, el valor de la fuerza electrostática entre las partículas se puede determinar aplicando directamente la ecuación que expresa la ley de Coulomb:

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{(r_{12})^2}$$

$$F = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$F = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-18} \text{ C}^2}{9,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \quad F = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

Como las partículas tienen cargas de signos contrarios las fuerzas serán de atracción.

En la figura 3.16 se representa la dirección y sentido de estas fuerzas.

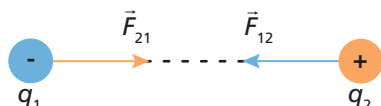


Fig. 3.16

Problema resuelto 3.2

Conociendo que el valor de la fuerza de interacción gravitatoria entre dos cuerpos puntuales se puede calcular a partir de la ecuación $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, compara el valor de esta fuerza con el de la fuerza de repulsión electrostática entre dos electrones que se encuentran a una distancia d .

Solución:

El valor de la fuerza de interacción electrostática entre los dos electrones se puede calcular a partir de la ecuación:

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{(r_{12})^2}$$

Donde los módulos de q_1 y q_2 son iguales al módulo de la carga del electrón $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y el valor de k se puede tomar como $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Por otra parte, se sabe que la masa del electrón es de $9,0 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ y que $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}$.

Para la relación entre F_e y F_g , sustituyendo por los valores numéricos, se tendrá que:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{(9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg})(9,0 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2} = 4,0 \cdot 10^{-42}$$

Este resultado permite concluir que entre dos electrones la interacción gravitatoria es muy pequeña en comparación con la electrostática

Problema resuelto 3.3

Tres cuerpos puntuales con cargas $q_1 = 5 \mu\text{C}$, $q_2 = 4 \mu\text{C}$ y $q_3 = -10 \mu\text{C}$, se encuentran en el vacío, alineados y en reposo (figura 3.17). Representa el diagrama de fuerzas y determina el valor, dirección y sentido de la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo cargado q_2 .

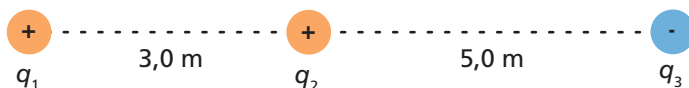


Fig. 3.17

Solución:

En el diagrama de fuerzas, se deben representar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo cargado central debido a la acción simultánea de los cuerpos con cargas q_1 y q_3 . Para ello es conveniente colocar un sistema de coordenadas (x, y) con el origen en la posición del cuerpo cargado q_2 (figura 3.18):

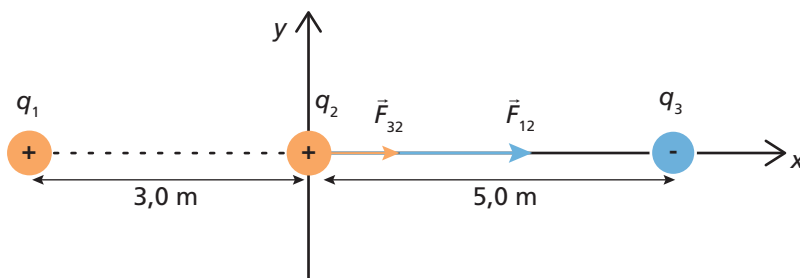


Fig. 3.18

Para determinar la fuerza neta $\vec{F}_R$ debemos identificar las fuerzas que actúan sobre la carga considerada y construir un diagrama vectorial, donde:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32} \quad 3.4$$

El módulo de cada una de estas fuerzas se puede calcular aplicando la ley de Coulomb.

$$F_{12} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{(r_{12})^2} \text{ y } F_{32} = k \frac{|q_3| \cdot |q_2|}{(r_{32})^2}$$

$\vec{F}_{12}$ es la fuerza que ejerce el cuerpo cargado 1 sobre el cuerpo cargado 2, y apunta hacia la derecha (sentido positivo del eje x) por ser de

repulsión. $\vec{F}_{32}$ es la fuerza que ejerce el cuerpo cargado 3 sobre el cuerpo cargado 2 y apunta hacia la derecha (sentido positivo del eje x) por ser de atracción.

Al remplazar los valores de q_1 , q_2 , q_3 , r y k obtenemos:

$$F_{12} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ N y } F_{32} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Entonces, según se ve en el diagrama de fuerzas, la suma del valor de los vectores fuerza según el principio de superposición será:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

$$F_R = F_{13} + F_{23}$$

El valor de la fuerza neta sobre el cuerpo cargado q_2 , es $F_R = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$, actuando en el sentido positivo del eje de las x . la representación gráfica del vector F_R (figura 3.19) la modelamos a continuación.

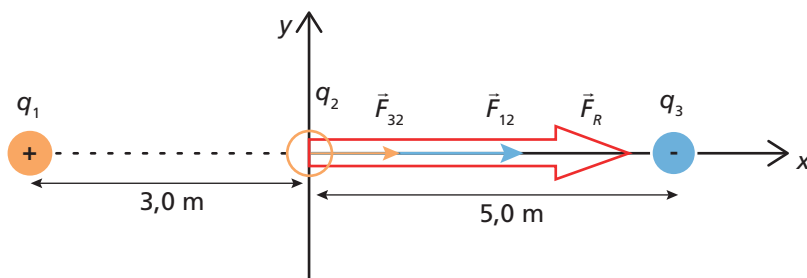


Fig. 3.19

Problema resuelto 3.4

Tres cuerpos puntuales con cargas $q_1 = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = -0,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, $q_3 = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, están ubicados en los vértices de un triángulo rectángulo como se muestra en la figura 3.20. Calcula la fuerza neta (magnitud, dirección y sentido) resultante sobre q_3 si se conoce que $r_{13} = 1,19 \text{ m}$ y $r_{23} = 0,5 \text{ m}$.

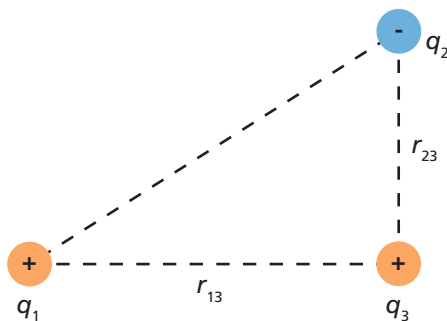
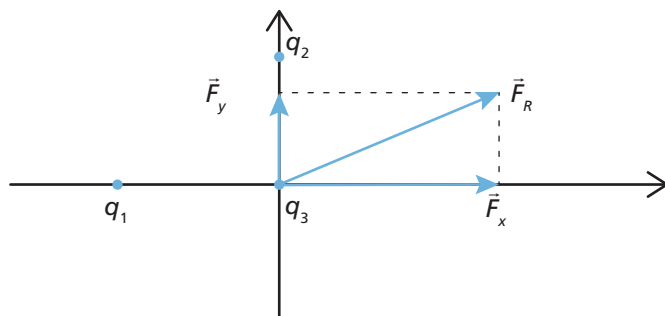


Fig. 3.20

Solución:

En el diagrama de fuerzas, se deben representar las fuerzas que se ejercen sobre el cuerpo con carga q_3 debido a la acción simultánea de los cuerpos con cargas q_1 y q_2 . Para ello puede seleccionarse un sistema de coordenadas con su origen en el cuerpo con q_3 como se puede observar en la figura 3.21.

**Fig. 3.21**

La fuerza $\vec{F}_{13}$ entre q_1 y q_3 es de repulsión y la fuerza $\vec{F}_{23}$, entre q_2 y q_3 , es de atracción según los signos de las cargas.

Usando la ley de Coulomb para calcular el módulo de $\vec{F}_{13}$ y $\vec{F}_{23}$, reemplazando los valores que están en el enunciado y considerando que $k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ tenemos:

$$F_{13} = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r_{13}^2} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ N} \text{ y } F_{23} = k \frac{|q_2 \cdot q_3|}{r_{23}^2} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Para determinar el módulo de la fuerza neta que actúa sobre q_3 , podemos usar el teorema de Pitágoras: el módulo del vector fuerza resultante coincide con la hipotenusa del triángulo.

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

$$F_R = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = 4,06 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Finalmente, el ángulo de la fuerza neta respecto al eje x, nos da su dirección y lo podemos determinar por la función trigonométrica:

$$\varnothing = \tan^{-1} \frac{F_{23}}{F_{13}} = 62,3^\circ$$

¿Sabías que...?

Frotar con un paño seco una superficie para liberarla de polvo puede ser contraproducente porque puede electrizar a las partículas de polvo. Una vez cargadas eléctricamente, se pueden adherir a cualquier objeto cercano, de modo que serán transferidas de un objeto a otro. Lo recomendable es realizarlo con un paño húmedo.

Comprueba tus conocimientos

5. En la figura 3.22 se muestran distribuciones de partículas cargadas eléctricamente que se encuentran en reposo y en el vacío. Representa en cada uno de los casos la fuerza de interacción entre ellas.

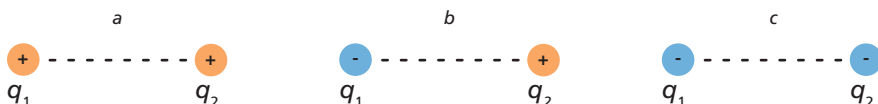


Fig. 3.22

6. Dos cuerpos puntuales con carga q_1 y q_2 están en reposo y en el vacío, separados a una distancia de 3,0 cm repeliéndose mutuamente con una fuerza de $2,0 \cdot 10^{-5}$ N. Si separamos los cuerpos a una distancia dos veces mayor que la inicial. Calcula el nuevo valor de la fuerza electrostática entre los cuerpos.
7. En la figura 3.23, se muestra la fuerza de interacción entre dos partículas cargadas eléctricamente en reposo y en el vacío. A partir de los datos que se muestran:

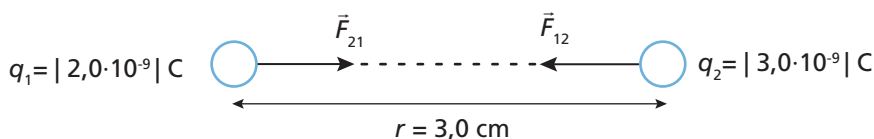


Fig. 3.23

- Identifica la naturaleza eléctrica de las partículas. Justifica
- Calcula el valor de la fuerza electrostática con que interactúan.
- Si cambiamos una de las partículas por otra de mayor carga eléctrica y mantenemos la misma distancia ¿la fuerza de interacción entre ambas tendrá el mismo valor que el calculado? Explica tu respuesta.

8. Se tienen dos cuerpos puntuales con cargas q_1 y q_2 , en reposo y en el vacío. Si se conoce que la fuerza electrostática entre ellos tiene un valor de $1,2 \cdot 10^{-5}$ N y los valores de las cargas son $3,0 \cdot 10^{-9}$ C y $4,0 \cdot 10^{-9}$ C respectivamente:

- Realiza un esquema con la situación descrita y representa las fuerzas con que interactúan ambos cuerpos puntuales.
- Determina la distancia a la que se encuentran dichos cuerpos puntuales.

9. ¿Qué plantea el principio de superposición?

10. Tres cuerpos puntuales con carga de igual valor y signo, se encuentran en reposo en el vacío, como se representa en la figura 3.24. La fuerza electrostática ejercida por el primer cuerpo sobre el segundo es de $2,0 \cdot 10^{-9}$ N.

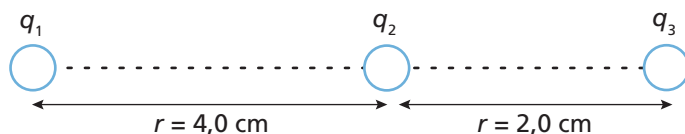


Fig. 3.24

- Calcula el valor de la fuerza electrostática que ejerce el tercer cuerpo sobre el segundo.
- Calcula el valor de la fuerza electrostática resultante sobre el segundo cuerpo.
- Determina el valor de la carga eléctrica de los cuerpos puntuales.

11. En la figura 3.25 se muestran tres partículas con carga eléctrica, en reposo y en el vacío. La fuerza electrostática del tercer cuerpo sobre el segundo, tiene un valor igual a $2,0 \cdot 10^{-2}$ N.

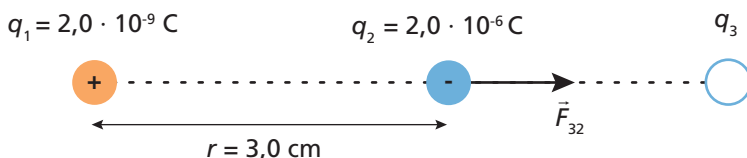


Fig. 3.25

- ¿Cuál es la naturaleza (signo) de la carga de la tercera partícula?
- Representa la fuerza electrostática que ejerce la primera partícula sobre la segunda y determina su valor.

c) Determina gráfica y analíticamente la fuerza resultante sobre la segunda partícula.

12. En la figura 3.26 se muestran tres partículas cargadas eléctricamente, en reposo y en el vacío y las fuerzas electrostáticas que ejercen la primera y la tercera sobre la segunda partícula.

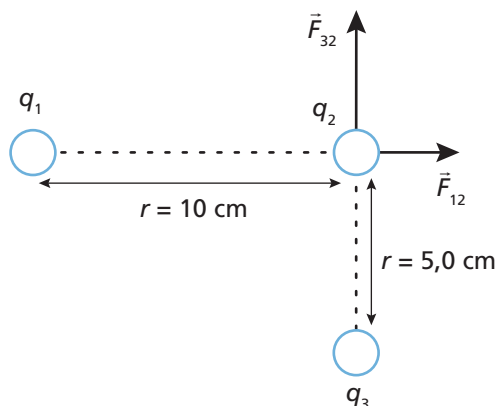


Fig. 3.26

- ¿La carga eléctrica de la primera y tercera partículas tiene signo positivo o negativo? Explica.
- Determina gráficamente la fuerza resultante sobre la segunda partícula.
- Si se conoce que el módulo de la carga de las tres partículas es el mismo y su valor es $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ C}$, calcula el valor de la fuerza resultante sobre la segunda partícula.

3.3 Campo electrostático. Vector intensidad del campo electrostático. Representación gráfica del campo electrostático

Ya conocemos que las partículas cargadas interactúan entre sí y que, debido a ello, también lo hacen los cuerpos electrizados. Además, mediante la Ley de Coulomb se puede calcular el valor de la fuerza en dichas interacciones. Debemos ahora analizar cómo se efectúan estas interacciones.

De nuestra experiencia cotidiana sabemos que si en un árbol cuelga un fruto que no está al alcance de nuestras manos, podemos usar una varilla larga para desprenderlo; o sea, mediante la varilla se transmite la acción de nuestras manos hacia el fruto. En general para explicar cómo ocurre la

acción de un cuerpo sobre otro, primero averiguamos si entre ellos existe algún enlace, algo así como un hilo, una varilla, etc. Si existen estos enlaces, decimos que la interacción entre los cuerpos se transmite a través de ellos.

No siempre es posible observar dichos enlaces, pero no por eso debemos asumir que las acciones entre los cuerpos a determinada distancia se realizan sin ellos.

Es posible que una persona que desconozca cómo se propaga el sonido en el aire pueda admitir que las cuerdas vocales de otra persona, al hablar, actúan directamente sobre sus oídos, considerando que la transmisión del sonido por un medio invisible, como es el aire, es imposible. No obstante, se sabe que a través del aire las ondas sonoras se propagan del cuerpo emisor al cuerpo receptor.

Todos los ejemplos analizados tienen en común que el medio transmisor de las interacciones es determinada sustancia, y que estas interacciones, demoran un tiempo en propagarse por el medio transmisor. Por ejemplo, al escuchar el eco nos percatamos de que el sonido se propaga con una velocidad finita, al demorar cierto tiempo en ir de un lugar a otro.

Inicialmente, al no lograr encontrar el medio a través del cual se transmitían las interacciones eléctricas, se llegó a admitir que estas no necesitaban ningún medio, es decir se efectuaban “a distancia” y de forma instantánea. No fue hasta mediados del siglo XIX que el científico inglés Michael Faraday concibió una nueva teoría denominada **teoría del campo eléctrico**.

¿Sabías que...?

Existen dispositivos que se basan en la aplicación de campos eléctricos de baja intensidad para la protección contra el ataque de tiburones. Los buzos utilizan el dispositivo de la figura 3.27 a, que se puede colocar en el traje o en el pie, creando un campo eléctrico de baja intensidad, que es captado por el tiburón, como una señal de peligro y no se acerca al buzo. En la figura 3.27 b se muestran las líneas de fuerza del campo eléctrico que se crean alrededor del buzo cuando utiliza este tipo de protección.



Fig. 3.27 a

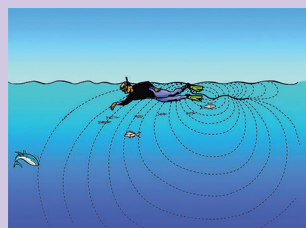


Fig. 3.27 b

De acuerdo con las ideas de Faraday, los cuerpos cargados no actúan directamente unos sobre otros, sino por mediación de lo que se denominó campo eléctrico.

En la actualidad conocemos que el campo electromagnético, del cual el campo eléctrico es un caso particular, es un sistema físico.

Este sistema, como en el caso de los cuerpos, posee un conjunto de propiedades bien caracterizadas. Entre estas propiedades está la de transmitir las interacciones eléctricas entre los cuerpos cargados.

El campo electromagnético, al igual que el campo gravitatorio, es un tipo de sistema material que por sus propiedades se diferencia de la sustancia.

El campo eléctrico de las partículas cargadas en reposo se denomina campo electrostático.

Vector intensidad de campo electrostático

Para caracterizar cuantitativamente el campo electrostático podemos utilizar un cuerpo puntual con una carga positiva lo suficientemente pequeña (q_0) para no alterar el campo que se quiere estudiar. A este cuerpo puntual lo llamaremos carga de prueba o cuerpo de prueba.

Si en un punto cualquiera de un campo electrostático se colocan sucesivamente cuerpos de prueba con diferentes cargas eléctricas, se comprueba que la fuerza que ejerce el campo electrostático sobre ellos es directamente proporcional a sus respectivas cargas eléctricas. De aquí que la razón entre la fuerza coulombiana y la carga eléctrica de prueba ($\vec{F}/q_0$) se mantenga constante para cada punto del campo electrostático (figura 3.28).

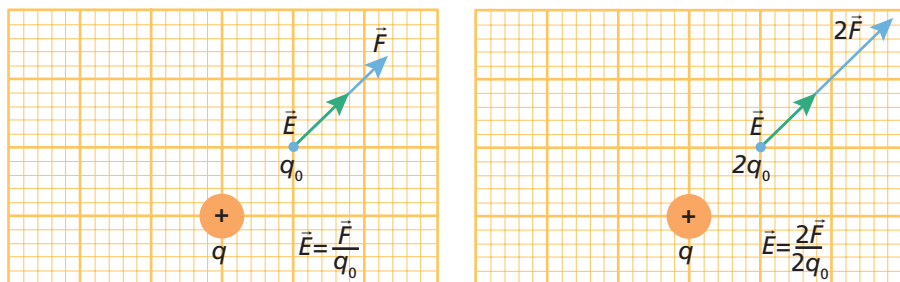


Fig. 3.28 El valor de la relación entre la fuerza coulombiana sobre la carga de prueba y el valor de la carga de prueba permanece constante para todos los puntos del campo electrostático inherente al cuerpo cargado q

Por lo tanto, esta cantidad puede considerarse como una característica del campo electrostático. A esta cantidad se le denomina vector intensidad del campo electrostático, y se representa como $\vec{E}$:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad 3.5$$

La intensidad del campo electrostático en un punto dado es una magnitud vectorial que expresa la razón entre la fuerza con la cual el campo electrostático actúa sobre un cuerpo cargado de prueba colocado en dicho punto y el valor de la carga del cuerpo cargado.

Representación gráfica del campo electrostático

La representación geométrica del campo electrostático da una imagen visual sencilla, mediante la cual se puede hacer un análisis cualitativo de este.

Una forma de representar el campo electrostático en una región del espacio, es utilizando el vector intensidad de campo electrostático como aparece representado en la figura 3.29. En esta figura se observa cómo, en las proximidades de los cuerpos puntuales cargados, el vector intensidad del campo es más largo, lo que indica que el campo es más intenso en estos puntos que en los más alejados; donde el vector es más pequeño.

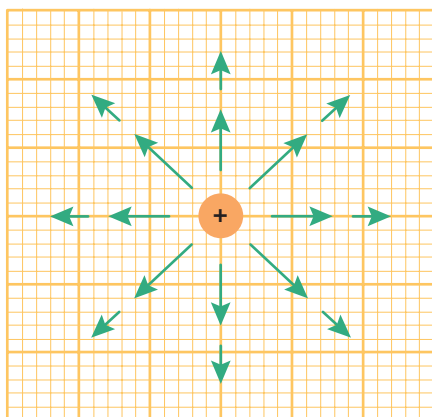


Fig. 3.29 La longitud de las flechas representa el valor del vector intensidad de campo electrostático. La longitud es la misma a iguales distancias del cuerpo puntual cargado y disminuye a medida que la distancia es mayor

Además, para $+q$ el sentido del vector intensidad del campo en cada punto es alejándose del cuerpo, mientras que para $-q$; el sentido de dicho vector está dirigido hacia el cuerpo.

Otro método creado por Faraday, muy utilizado y más conveniente para representar el campo electrostático es el de las **líneas de fuerza**. Vale precisar que Faraday no utilizó el concepto de vector intensidad de campo en el sentido que hoy le damos a este tipo de representación del campo electrostático.

Las líneas de fuerza son líneas continuas, cuya tangente en cada punto tiene la dirección del vector intensidad del vector campo.

Para saber el sentido del vector intensidad de campo electrostático en cada punto de las líneas de fuerza, a estas se les asigna también un sentido. Convencionalmente se asume que las líneas de fuerza salen de la carga positiva y terminan en la negativa, o en el infinito.

En la figura 3.30 a) se representa mediante líneas de fuerzas la configuración geométrica del campo electrostático en el caso de un cuerpo puntual cargado positivamente y en la 3.30 b) para uno cargado negativamente. Como se observa, en las proximidades de los cuerpos cargados las líneas de fuerzas están más unidas, eso indica que el campo electrostático es más intenso que en los puntos más alejados, donde las líneas se encuentran más separadas.

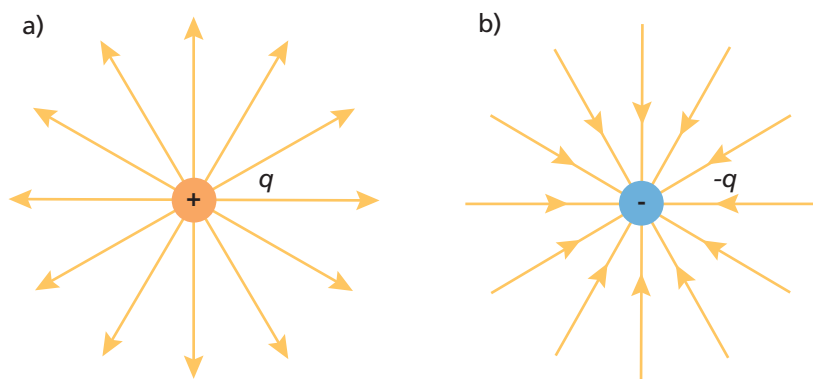


Fig. 3.30 Para el cuerpo con carga $+q$, el sentido de las líneas es saliendo del cuerpo cargado, mientras para el de $-q$, es entrando

La foto (figura 3.31) muestra cómo se orientan pequeñas partículas en el campo de un cuerpo cargado puntual “siguiendo” las líneas de fuerza

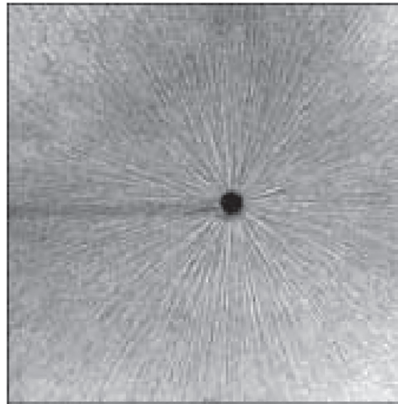


Fig. 3.31 La orientación de pequeñas partículas en el campo electrostático inherente al cuerpo cargado puntual permite “visualizar” las líneas de fuerza de fuerza

En la figura 3.32 a) se representa el caso de dos cuerpos puntuales con cargas de diferente signo y la foto en la 3.30 b) muestra cómo se orientan pequeñas partículas en este campo.

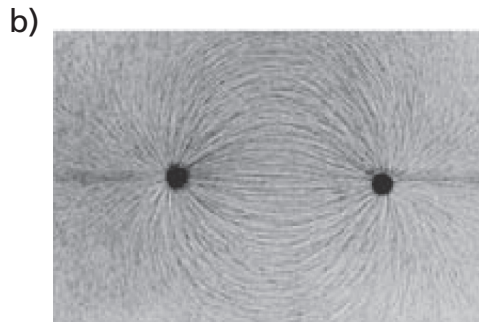
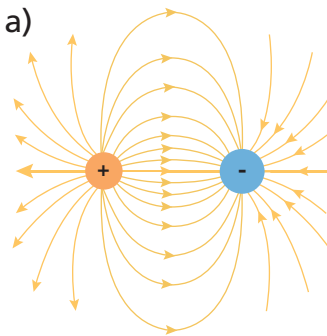


Fig. 3.32 Las líneas de fuerza se representan saliendo del cuerpo con carga positiva y entrando en el de carga negativa

Un ejemplo interesante es el mostrado en la foto (figura 3.33), donde se “visualizan” las líneas de fuerza en el caso de dos placas planas y paralelas con cargas de signo diferente, separadas por una pequeña distancia.

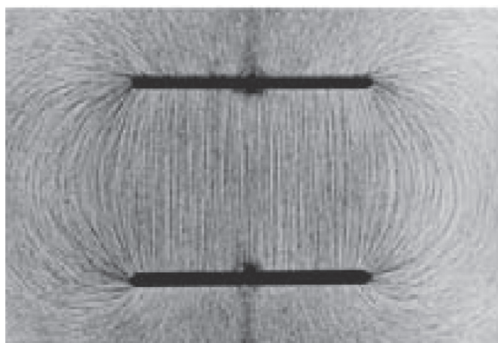


Fig. 3.33 En la región interior, alejada de los bordes, las líneas son paralelas e igualmente espaciadas, esto nos indica que en esa zona el vector intensidad de campo electrostático tiene el mismo valor y la misma dirección en todos los puntos. En este caso se dice que este es un campo uniforme



De la historia

Durante las tormentas eléctricas pueden originarse intensos campos eléctricos que dan lugar a la ionización del aire y provocan la luminiscencia de las cimas de los árboles y de los mástiles en los barcos. Este efecto, llamado descarga de corona, en tiempos pasados, recibió el nombre de fuego de San Telmo y fue motivo de supersticiones. Cristóbal Colón se topó con el fuego de San Telmo el 26 de octubre de 1493, en el contexto del segundo viaje a América. También la expedición de Magallanes y Juan Sebastián Elcano en la primera vuelta al mundo lo presenciaron. Este fenómeno puede ocurrir en los aviones y dirigibles. En los dirigibles era peligroso porque muchos de ellos se cargaban con hidrógeno y podían incendiarse, como ocurrió en 1937 con el dirigible Hindenburg. Benjamín Franklin observó correctamente en 1749 que en realidad el fuego de San Telmo es de naturaleza eléctrica.

Comprueba tus conocimientos

13. Explica cómo ocurren las interacciones entre los cuerpos cargados eléctricamente
14. Define los conceptos de:
 - Campo electrostático
 - Intensidad del campo electrostático.
 - Líneas de fuerza del campo electrostático.
15. ¿Un campo electrostático inherente a una partícula cargada puede ejercer una fuerza sobre esa misma partícula? Argumenta tu respuesta.

- 16.** ¿Cómo podemos detectar la presencia de un campo electrostático?
- 17.** Se conoce que sobre un cuerpo puntual con carga $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$, actúa una fuerza de valor 10^{-5} N . Determina el valor de la intensidad del campo electrostático en dicho punto.
- 18.** En las figuras 3.34 a y 3.34 b se muestran dos partículas cargadas eléctricamente y un punto A en las cercanías de ellas.

- a) Representa en cada caso la fuerza que ejerce el campo electrostático sobre un cuerpo de prueba q_0 colocado en dichos puntos.
- b) Representa el vector intensidad del campo electrostático en cada uno de los casos.

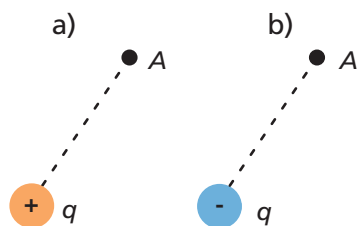
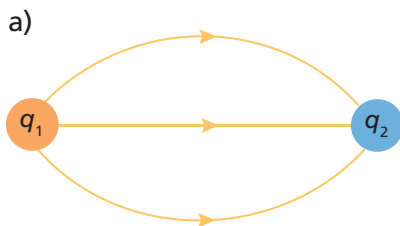


Fig. 3.34

- 19.** En la figura 3.35 (a, b, c) se muestran un sistema de cuerpos puntuales cargados eléctricamente y colocados en el vacío. En cada uno de los casos siguientes, selecciona la respuesta correcta.
- “Para que la distribución de líneas de fuerza sea la indicada, el signo de las cargas debe ser”:

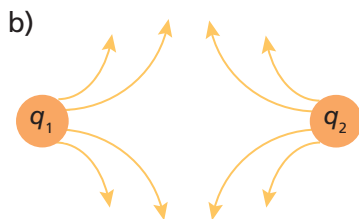
19.1

- a) q_1 positiva y q_2 negativa.
 b) q_1 negativa y q_2 positiva.
 c) q_1 y q_2 positivas.



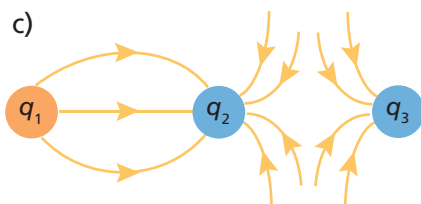
19.2

- a) q_1 y q_2 negativas.
 b) q_1 y q_2 positivas.
 c) q_1 positiva y q_2 negativa.



19.3

- a) q_1 y q_2 positivas, q_3 negativa.
 b) q_1 y q_3 positivas, q_2 negativa.
 c) q_2 y q_3 negativas, q_1 positiva.



20. En la figura 3.36 se muestran las líneas de fuerza de dos cuerpos puntuales cargados eléctricamente.

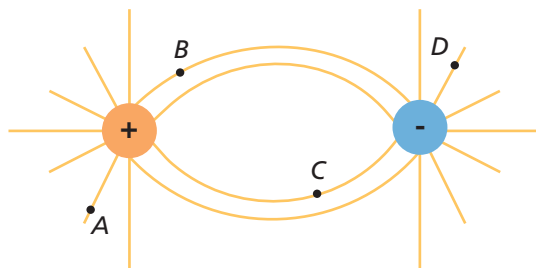


Fig. 3.36

- Señale el sentido de las líneas de fuerza.
- Represente el vector intensidad del campo electrostático en los puntos A, B, C y D.
- ¿Pueden cortarse las líneas de fuerza en algún punto? Argumenta su respuesta.

3.4 Cálculo de la intensidad de campo eléctrico en un sistema de cuerpos cargados puntuales

Consideremos que un cuerpo de prueba, con carga q_0 , se coloca a una distancia r de un cuerpo puntual cargado con carga q . El módulo de la fuerza que ejerce sobre el cuerpo de prueba, se puede calcular utilizando la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{|q \cdot q_0|}{r^2}$$

El módulo de la intensidad del campo electrostático en el punto donde se sitúa el cuerpo de prueba se obtiene mediante la ecuación:

$$E = \frac{F}{q_0}$$

Sustituyendo en esta ecuación el valor de la fuerza coulombiana (F), se obtiene:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad 3.6$$

Esta ecuación permite calcular el módulo de la intensidad del campo electrostático en cualquier punto alrededor de un cuerpo puntual cargado, conociendo su carga y la distancia a la que se encuentra el punto del cuerpo.

La dirección del vector $\vec{E}$ es la línea radial que pasa por el punto y el cuerpo puntual cargado. Si la carga es positiva, su sentido apunta hacia afuera del cuerpo, y si la carga es negativa, hacia el cuerpo.

La dependencia de la intensidad del campo con la distancia se muestra en la gráfica de la figura 3.37. Nota que si para un punto que dista una distancia r_0 del cuerpo puntual, la intensidad del campo tiene un valor E_0 , para otro punto más distante $r = 2r_0$, la intensidad disminuye en un cuarto con respecto al otro valor.

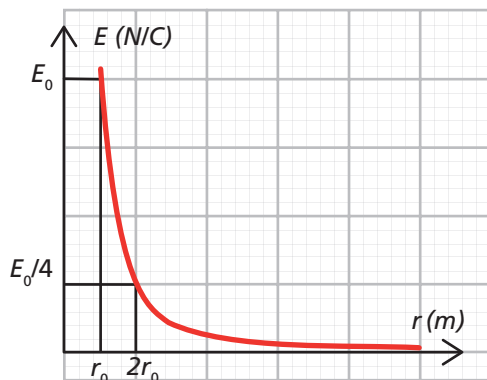


Fig. 3.37 Dependencia inversa de la intensidad del campo eléctrico de un cuerpo puntual, del cuadrado de la distancia que lo separa del punto

¿Cómo proceder para calcular $\vec{E}$ en el caso de un sistema de cuerpos puntuales cargados?

Supongamos que se tiene un sistema de n cuerpos puntuales cargados y se desea calcular la intensidad de campo electrostático en un punto cualquiera P (figura 3.38).

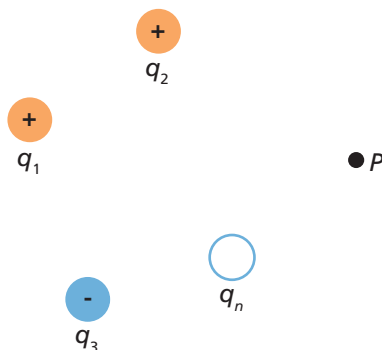


Fig. 3.38 Distribución de n cuerpos cargados puntuales

Si en el punto P se coloca un cuerpo cargado de prueba q_0 (figura 3.39), de acuerdo con el principio de superposición, la fuerza resultante sobre este cuerpo será igual a la suma de las fuerzas que cada uno de los cuerpos cargados ejerza sobre el cuerpo cargado de prueba:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n$$

Dividiendo los términos de la ecuación entre q_0 , se obtiene que:

$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

Por lo tanto, para calcular la intensidad de campo electrostático resultante cuando se tiene un sistema de cuerpos cargados puntuales se deben sumar la intensidad del campo de cada uno de los cuerpos cargados por separado.

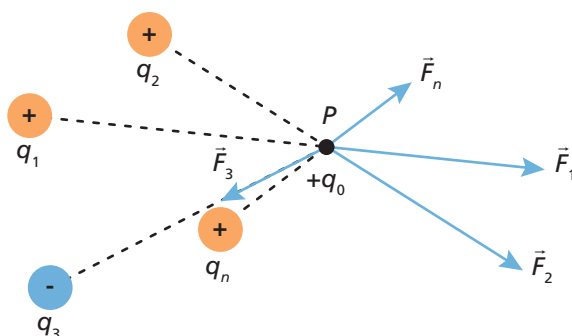


Fig. 3.39 La fuerza resultante sobre una carga de prueba colocada en P es igual a la suma de las fuerzas de interacción con cada uno de los cuerpos cargados separadamente

Problema resuelto 3.5

Calcula el valor del vector intensidad de campo electrostático en un punto A situado 2 m a la derecha de un cuerpo puntual, que suponemos en el vacío, con una carga de $4,0 \cdot 10^{-8}$ C. Representa la dirección y sentido del vector intensidad de campo en A.

Solución:

La situación planteada se puede representar de la forma siguiente (figura 3.40):



Fig. 3.40

De acuerdo con los datos y las condiciones del problema, el módulo de $\vec{E}$ se puede calcular directamente a partir de la ecuación:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E = \frac{(9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(4,0 \cdot 10^{-8} / \text{C})}{(2 \text{ m})^2} = 9 \cdot 10^1 \text{ N/C}$$

La dirección y sentido de vector intensidad de campo (no a escala) se puede representar de la manera siguiente (figura 3.41):



Fig. 3.41

Problema resuelto 3.6

En la base de un triángulo rectángulo en P se han colocado dos partículas con cargas positivas de valores $q_1 = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ y $q_2 = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ como indica la figura 3.42.

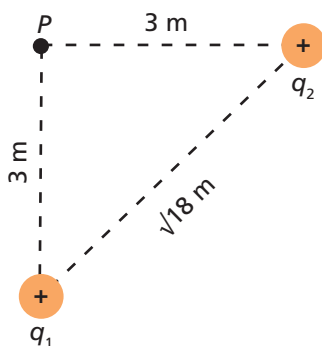


Fig. 3.42

- Determina el valor, la dirección y el sentido de la intensidad de campo eléctrico resultante en el punto P.
- Determina el valor, la dirección y el sentido de la fuerza eléctrica resultante sobre la partícula con carga $q_3 = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$, colocada en P.

Solución:

- En correspondencia con las condiciones planteadas, los vectores intensidad de campo en P inherentes a las partículas cargadas q_1 y q_2 y el vector resultante se pueden representar como se indica en la figura 3.43:

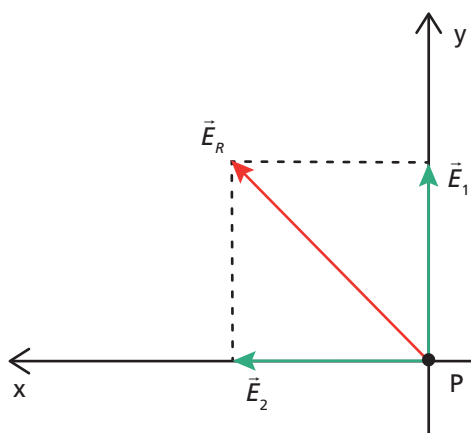


Fig. 3.43

Los valores de los vectores $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$, se pueden calcular directamente a partir de la ecuación:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_{1P}^2} = \left(9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2\right) \frac{4,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}}{(3,0 \text{ m})^2} = 4,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_{2P}^2} = \left(9,0 \cdot \frac{10^9 \text{ Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{3,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}}{(3,0 \text{ m})^2} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ pero como el ángulo entre los vectores $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ es de 90°

$$E_R = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$E_R = \sqrt{(4,0 \cdot 10^4 \text{ N/C})^2 + (3,0 \cdot 10^4 \text{ N/C})^2} = 5,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

Para determinar la dirección y sentido se puede calcular el ángulo que forma el vector con el eje de las x:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{E_1}{E_2} = \tan^{-1} \frac{4,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}}{3,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}} \approx \tan^{-1} 1,33$$

$$\varphi \approx 53^\circ$$

- b) El valor de la fuerza que sobre la partícula cargada colocada en P se puede calcular directamente usando la ecuación:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Sustituyendo por los valores numéricos se tiene que:

$$F = (2,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}) (5,0 \cdot 10^4 \text{ N/C}) = 1,0 \text{ N}$$

La dirección y sentido de esta fuerza será igual que la del vector intensidad de campo en P, es decir, formará un ángulo $\varphi \approx 53^\circ$ con el eje de las x.

Comprueba tus conocimientos

- 21.** Plantea la ecuación que permite determinar la intensidad del campo electrostático inherente a una partícula cargada eléctricamente en un punto e identifica sus magnitudes y unidades de medidas.
- 22.** ¿Cómo se puede determinar la intensidad del campo electrostático en un punto de un sistema de cuerpos puntuales cargados eléctricamente?
- 23.** La figura 3.44 muestra dos cuerpos puntuales colocados en el vacío, que tienen igual valor de carga eléctrica, pero signos diferentes. Se ha representado el vector intensidad del campo electrostático inherente a q_1 , que tiene un valor de $6,0 \frac{\text{N}}{\text{C}}$. Determina:

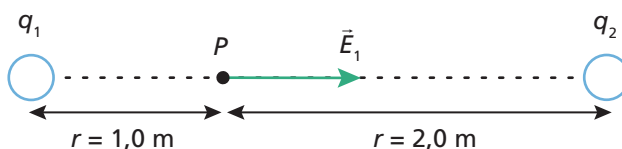


Fig. 3.44

- a) La naturaleza eléctrica de cada cuerpo puntual.
- b) El valor de la carga eléctrica de los cuerpos puntuales.
- c) El valor de la intensidad del campo electrostático asociado a la carga de la segunda partícula en el punto P.
- d) Valor, dirección y sentido del vector intensidad del campo electrostático resultante en el punto P.

3.5 Trabajo en el campo electrostático. Energía potencial de un cuerpo cargado en un campo electrostático. Potencial electrostático y su relación con la intensidad de campo. Cálculo del potencial en sistemas de cuerpos cargados puntuales

Se puede demostrar que el campo electrostático, al igual que el campo gravitatorio, es un campo de fuerza conservativas, es decir, que el trabajo

alejado como para que las fuerzas de interacción electrostática puedan ser no consideradas.

Por otra parte, como el potencial en un punto depende de la elección del nivel de referencia, lo que tiene mayor importancia y significado práctico es la *diferencia de potencial* entre dos puntos, la cual no depende de la elección del nivel de referencia.

La diferencia de potencial entre dos puntos 1 y 2 es igual a la razón entre las diferencias de energía potencial entre dichos puntos por unidad de carga o, lo que es lo mismo, al trabajo realizado, con signo contrario, para trasladar sin aceleración un cuerpo con carga unitaria del punto 1 al punto 2.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{E_{pe1} - E_{pe2}}{q} = \frac{W_{12}}{q} \quad 3.9$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{E_{pe2} - E_{pe1}}{q} = -\frac{W_{12}}{q}$$

Relación entre el potencial electrostático y la intensidad de campo

Se puede resumir que hay dos formas de caracterizar cuantitativamente al campo electrostático: una vectorial, mediante la magnitud *intensidad de campo electrostático* y otra escalar, mediante la magnitud *potencial electrostático*.

Estas dos magnitudes están estrechamente relacionadas y en el caso de que el campo sea electrostático sea uniforme, es bastante sencillo encontrar esta relación.

Consideremos un cuerpo cargado de prueba (q_0) que se traslada, en un campo eléctrico uniforme, del punto 1 al punto 2 (figura 3.45), separados una distancia Δd .

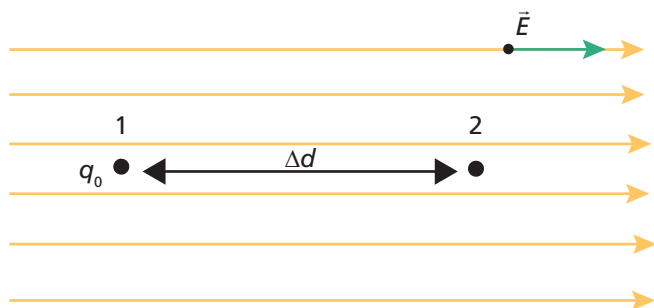


Fig. 3.45 La carga de prueba q_0 se traslada del punto 1 al 2 bajo la acción del campo electrostático uniforme

151

Cálculo del potencial para un cuerpo cargado puntual y para un sistema de cuerpos puntuales cargados

Se puede demostrar que, para el caso de un cuerpo puntual, el valor del potencial en un punto cualquiera P está dado por:

$$\varphi_P = k \frac{q}{r} \quad 3.13$$

Donde q es el valor de la carga del cuerpo puntual y r la distancia del cuerpo al punto P.

Puede ser conveniente señalar que el valor del potencial puede ser positivo o negativo en dependencia del signo de la carga.

En la figura 3.47 se representa la gráfica de la dependencia de φ en función r para el caso de un cuerpo puntual con carga positiva.

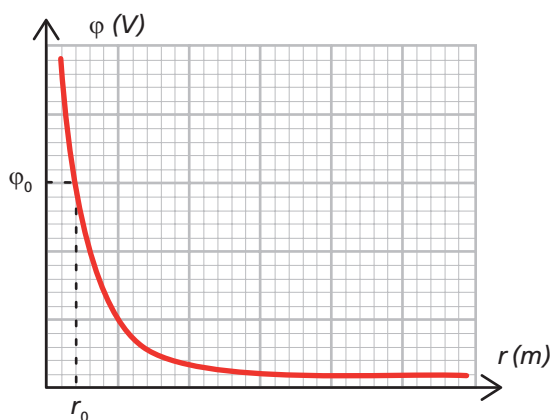


Fig. 3.47 Dependencia del potencial con el inverso de la distancia del cuerpo puntual cargado a un punto del campo

En el caso de un sistema de n cuerpos puntuales cargados (figura 3.48), en virtud del principio de superposición, el valor del potencial en un punto cualquiera del campo, estará dado por la suma algebraica de los potenciales calculados para cada uno de los cuerpos cargados de forma separada, es decir:

$$\varphi_P = \varphi_{1_P} + \varphi_{2_P} + \varphi_{3_P} + \dots + \varphi_{n_P} \quad 3.14$$

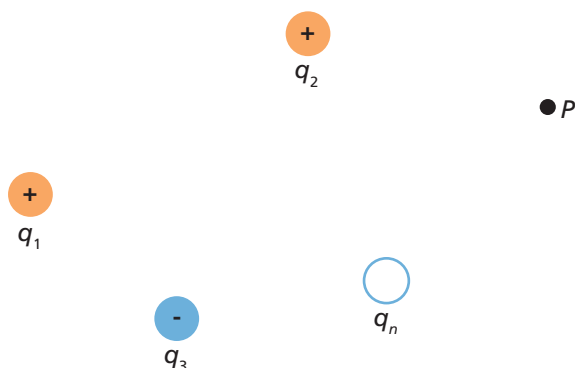


Fig. 3.48 Sistema de n cuerpos puntuales cargados

Problema resuelto 3.7

La diferencia de potencial entre dos puntos, separados una distancia de 5 cm en un campo electrostático uniforme, es de 120 V. Halla el valor de la intensidad del campo electrostático.

Solución:

El valor de la intensidad de campo electrostático se puede calcular, en este caso, de manera directa a partir de la ecuación:

$$E = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta d}$$

Expresando la distancia en metros y sustituyendo en la ecuación, se tiene que:

$$E = -\frac{120 \text{ V}}{0,05 \text{ m}}$$

$$E = -2,4 \cdot 10^2 \text{ N/C}$$

Problema resuelto 3.8

En los vértices de un cuadrado de lado igual a 10 cm se encuentran situados cuatro cuerpos puntuales, cargados positivamente. Calcula el potencial en el centro de cuadrado si el sistema se supone en el vacío y la carga de cada cuerpo es de $8 \mu\text{C}$.

Solución:

En este caso, como se trata de cuerpos puntuales cargados, el potencial en cualquier punto del campo es igual a la suma de los potenciales correspondientes a cada uno de los cuerpos cargados.

Como los valores de las cargas de cada cuerpo son iguales y el punto en que se quiere calcular el potencial está equidistante de cada cuerpo, el potencial en dicho punto será cuatro veces el potencial de uno de los cuerpos cargados.

Si designamos por P al punto situado en el centro del cuadrado se puede plantear para el potencial resultante en este punto φ_{R_p} , que:

$$\varphi_{R_p} = 4\varphi_{i_p} = 4k \frac{q_{i_p}}{r_{i_p}}$$

Donde q_{i_p} es el valor de la carga de cada cuerpo y r_{i_p} la distancia de cada cuerpo al punto P (0,07 m).

Sustituyendo por los valores numéricos en las unidades fundamentales, se obtiene que:

$$\begin{aligned} \varphi_{R_p} &= 4\varphi_{i_p} = 4k \frac{q_{i_p}}{r_{i_p}} \\ \varphi_{R_p} &\approx \frac{4 \left(9,0 \cdot \frac{10^9 \text{ Nm}^2}{\text{C}^2} \right) (8,0 \cdot 10^{-6} \text{ C})}{0,07 \text{ m}} \\ \varphi_{R_p} &\approx 4,0 \cdot 10^6 \text{ V} \end{aligned}$$

Comprueba tus conocimientos

- 24.** ¿Es el campo electrostático un campo de fuerzas conservativo? Argumenta tu respuesta.
- 25.** ¿A qué se denomina potencial electrostático? ¿Qué son las superficies equipotenciales y cómo se relacionan con las líneas de fuerza?
- 26.** ¿Pueden cortarse dos superficies equipotenciales? Explica tu respuesta.
- 27.** ¿Cómo determinar el potencial electrostático en un punto que está a una distancia r de un cuerpo puntual con carga q ?

28. Si en determinada región del espacio se tienen n cuerpos puntuales cargados eléctricamente, ¿cómo se puede determinar el potencial electrostático en cualquier punto de esa región?

29. Explica el significado de la ecuación:

$$E = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta d}$$

30. Tres cuerpos puntuales con cargas $q_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}$, $q_2 = -0,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}$, $q_3 = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ C}$, están ubicados en los vértices de un triángulo rectángulo como se muestra en la figura 3.49. Las distancias r_1 y r_2 son conocidas.

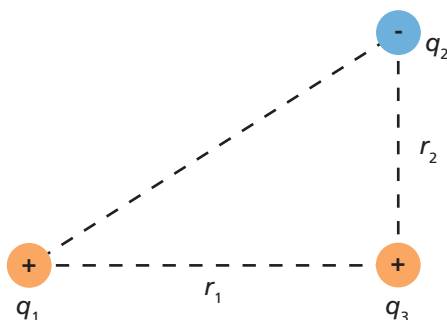


Fig. 3.49

- Calcula el potencial en el punto donde se encuentra colocado el cuerpo con carga q_3 .
- Calcula la energía potencial electrostática para el cuerpo de carga q_3 y explica el sentido físico del resultado.

3.6 Campo electrostático entre dos placas planas paralelas cargadas muy próximas entre sí

En general, los campos electrostáticos que se encuentran en la práctica están asociados a cuerpos extensos en los cuales se encuentra distribuida la carga eléctrica y no a cuerpos que puedan ser considerados puntuales.

Aunque la caracterización del campo en estos casos esta fuera del alcance de este libro, es posible conocer algunas de sus propiedades mediante experimentos sencillos. Un caso particularmente interesante es el del campo que existe entre dos laminas conductoras

separadas por una pequeña distancia, en comparación con su largo y ancho, pues se puede comprobar que en esta situación el campo es uniforme, vale decir que el valor, la dirección y el sentido del vector intensidad de campo electrostático es igual en todos los puntos de la región comprendida entre las placas que está alejada de los bordes (figura 3.50)

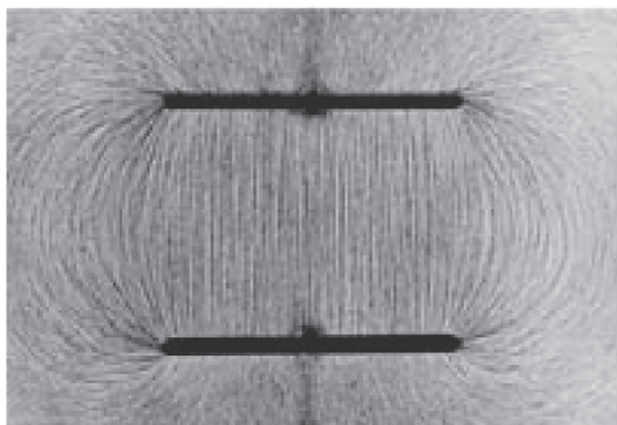


Fig. 3.50 Dos láminas planas y paralelas con cargas de signo diferente separadas por una pequeña distancia, sumergidas en un fluido en el que flotan pequeñas partículas que se alinean y en la región interior, alejada de los bordes, las líneas que forman las partículas son paralelas e igualmente espaciadas

Para el caso en que la región entre las placas este al vacío, se puede demostrar que el valor del campo en la región donde es uniforme está dado por la ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad 3.15$$

Donde $\mu_0 = 8,8542 \cdot 10^{12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$; es la ya conocida constante llamada **permitividad del vacío** y la **densidad superficial de carga**, es decir, la carga de una de las placas entre su área:

$$\sigma = \frac{q}{S} \quad 3.16$$

Como las líneas de fuerza del campo electrostático entre las láminas son paralelas y perpendiculares al plano de las láminas, las superficies equipotenciales son planos paralelos a las láminas (figura 3.51).

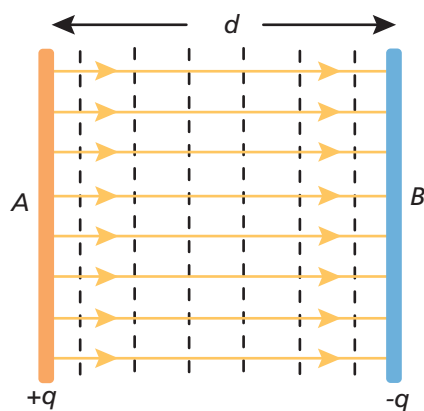


Fig. 3.51 Las líneas discontinuas representan las superficies equipotenciales

La diferencia de potencial entre las láminas será igual, en correspondencia con la definición, al trabajo realizado para trasladar un cuerpo cargado de prueba entre las láminas. Por lo tanto, para la diferencia de potencial entre las láminas se tendrá que:

$$\varphi_A - \varphi_B = E \cdot d$$

Donde E es el valor de la intensidad del campo entre las láminas y d la distancia entre las placas.

En la figura 3.52 se representa la gráfica de la variación del potencial entre las láminas con la distancia. ¿Cómo varía? El potencial electrostático entre las placas, disminuye en el sentido de las líneas de fuerza o, lo que es lo mismo, el potencial es mayor próximo a la placa positiva (lámina A) y menor próximo a la placa negativa (lámina B). En la gráfica se ha tomado como potencial cero la lámina con carga negativa, de manera que la ecuación 3.16 quedaría como:

$$\varphi = E \cdot d \quad 3.17$$

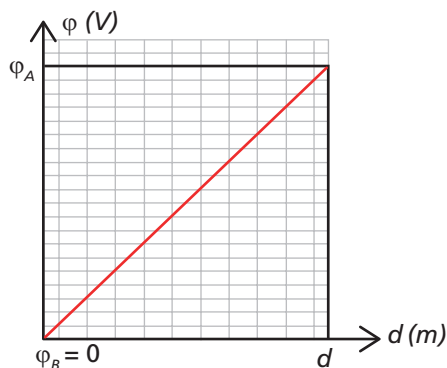


Fig. 3.52 Gráfica de la dependencia del potencial en el campo entre las láminas con la distancia de la lámina negativa a la positiva

Comprueba tus conocimientos

31. ¿A qué se denomina densidad superficial de carga?
32. ¿Qué dependencia existe entre la intensidad del campo electrostático entre dos placas cargadas, separadas una pequeña distancia y la densidad superficial de carga?
33. ¿Qué relación existe entre la intensidad del campo electrostático y la diferencia de potencial entre dos placas paralelas cargadas separadas una pequeña distancia?

3.7 Campo electrostático de una esfera metálica cargada. Poder de las puntas. Conductores en un campo electrostático externo

Este es otro caso particularmente interesante del campo electrostático cuando se trata de cuerpos extensos cargados.

Cuando un conductor aislado se carga, por ejemplo, negativamente, los electrones en exceso se repelen hasta alcanzar la mayor separación posible, es decir, hasta la superficie del conductor. En este caso la distribución de la carga en la superficie es tal que en el interior del conductor el campo electrostático es nulo, las líneas del campo son perpendiculares a la superficie y, como consecuencia, todo el volumen del cuerpo es equipotencial (figura 3.53).

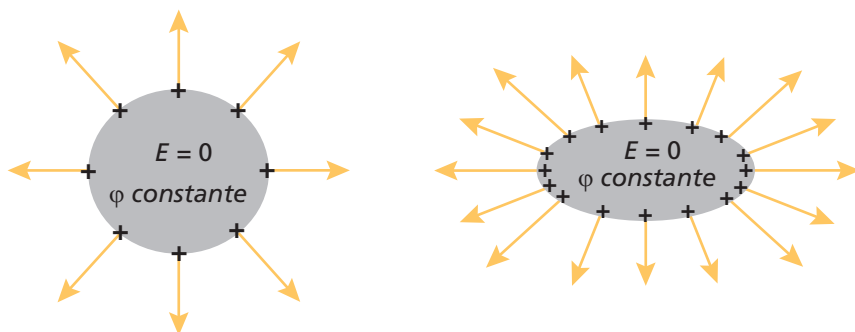


Fig. 3.53 En todo conductor cargado y aislado la carga se redistribuye en su superficie hasta alcanzar el equilibrio y en estas condiciones la intensidad de campo dentro del conductor es nula, las líneas de fuerza son perpendiculares a la superficie en todos los puntos y el volumen del cuerpo es equipotencial

En la figura 3.54 se muestra cómo, en el caso de un conductor esférico, varía con la distancia al centro, el valor de la intensidad del campo electrostático y del potencial.

Nota que esta variación nos indica que el módulo de la intensidad de campo y el potencial de un cuerpo conductor esférico, para puntos situados a una distancia mayor o igual que el radio de la superficie, es igual a la de un cuerpo puntual de igual carga, colocado en su centro.

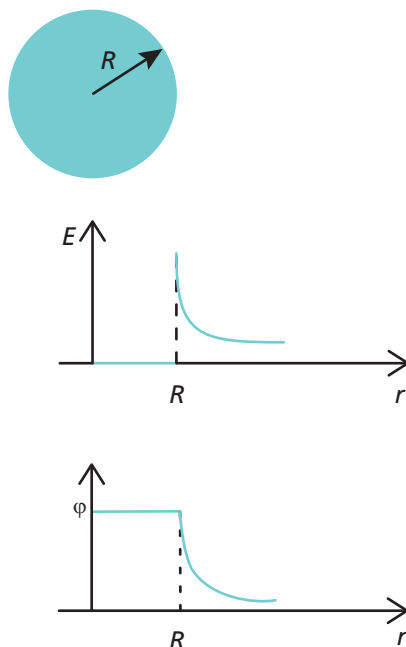


Fig. 3.54 En el interior del cuerpo esférico conductor cargado la intensidad del campo es nula y el valor del potencial es constante. Para puntos exteriores, tanto el campo como el potencial varían de la misma forma como cuando toda la carga está concentrada en el centro de la esfera

En el caso de un conductor esférico de radio R y carga q , su potencial estará dado por:

$$\varphi = k \frac{q}{R} \quad 3.18$$

Esta ecuación nos indica que conductores esféricos con igual carga y diferente radio adquieren potenciales diferentes: a mayor radio mayor potencial.



De la historia

En octubre de 1929 el físico estadounidense Robert J. Van de Graaff exhibió por primera vez un generador eléctrico que utilizó para realizar experimentos en física nuclear, en los que el voltaje obtenido era necesario para acelerar partículas cargadas que se hacían chocar contra blancos fijos a gran velocidad. Ya en 1931 este generador era capaz de alcanzar diferencias de potencial en el orden de 10^6 V. En la actualidad este tipo de generador electrostático se conoce como generador de Van de Graaff y por la facilidad con la que ilustra los fenómenos electrostáticos está presente hoy en la mayoría de los museos de ciencia del mundo.

La figura 3.55, muestra un modelo de generador de Van de Graaff. En la parte superior tiene incorporado una esfera metálica, hueca en su interior. En el presente epígrafe describiremos el campo y el potencial electrostático de una esfera metálica cargada.



Fig. 3.55

Poder de las puntas

Como el valor del vector intensidad de campo electrostático en la superficie de una esfera está dado por la ecuación:

$$E = k \frac{|q|}{R^2}$$

Donde: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ y ϵ_0 es la *permitividad* dieléctrica.

Podemos escribir que:

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

Por otra parte, como la densidad superficial de carga es $\sigma = \frac{q}{S}$, para una esfera se tendrá que:

$$\sigma = \frac{q}{4\pi a^2}$$

Despejando la carga de la ecuación de la densidad y sustituyendo en la ecuación de la intensidad, se obtiene:

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

El valor de la intensidad del campo electrostático en la superficie de la esfera es directamente proporcional a la densidad superficial de carga sobre ella. Esta relación resulta válida para cualquier cuerpo metálico cargado, sin importar su forma.

Por tanto, como en las zonas de mayor curvatura de los cuerpos, la densidad superficial de carga es menor porque el área es mayor, menor es la intensidad del campo electrostático en esos puntos, como se observa en el lado derecho del cuerpo de la figura 3.56. En el lado izquierdo del cuerpo, que termina en forma de punta, las líneas de fuerza del campo electrostático están más unidas. Los pararrayos se construyen terminados en puntas finas para que la intensidad del campo eléctrico sea grande y se produzca la descarga eléctrica en él.

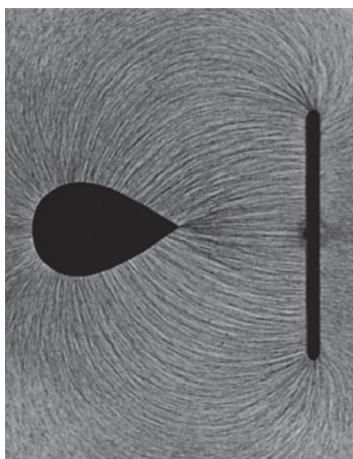


Fig. 3.56 La intensidad del campo electrostático es mayor en la punta

¿Sabías que...?

Durante una tormenta, se acumulan en las nubes enormes cantidades de carga eléctrica. Simultáneamente, otras cargas eléctricas de diferente signo se acumulan en el suelo. La acumulación de cargas continúa hasta que el potencial eléctrico se vuelve suficiente para iniciar una descarga eléctrica, que ocurre cuando la distribución de las cargas positivas y negativas forman un campo eléctrico lo suficientemente fuerte, produciéndose el rayo (figura 3.57).



Fig. 3.57

Este cae más fácilmente en los edificios elevados, los cuales, por ello, están provistos de pararrayos. Las instalaciones de pararrayos consisten en un mástil metálico (acero inoxidable, aluminio, cobre o acero) que termina en punta. La punta está unida a una toma de tierra eléctrica por medio de un cable de cobre conductor (figura 3.58).

La elevada intensidad de un rayo puede provocar paro cardíaco o respiratorio por electrocución de un ser vivo, debido al paso de la corriente de descarga, así como disipar calor por el efecto Joule pudiendo llegar a provocar incendios. Es por ello que se hace necesario la instalación de pararrayos para la protección tanto de seres vivos como de estructuras de diversa índole: edificios multifamiliares, industrias, antenas de telecomunicaciones entre otras. Las instalaciones de estos dispositivos se regulan en cada país por guías de recomendación o normas.

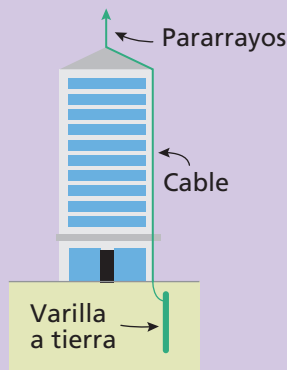


Fig. 3.58

Conductores en un campo eléctrico externo

Conocemos que, si un cuerpo conductor se encuentra bajo la influencia de un campo eléctrico externo, los electrones libres se desplazan en sentido contrario a la dirección del campo y como resultado una parte de la superficie del conductor queda con una carga de determinado signo y la otra con carga del signo contrario. Un caso sencillo de este fenómeno se muestra en la figura 3.59.

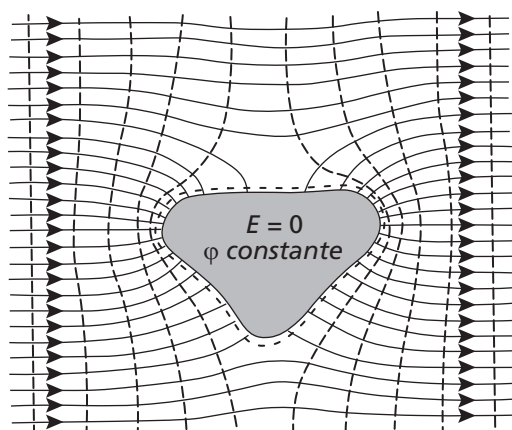


Fig. 3.59 En cuerpo conductor colocado en un campo electrostático se inducen cargas superficiales, distorsionando el campo externo (las líneas continuas representan las líneas de fuerza y las discontinuas las equipotenciales), de manera tal que dentro del conductor el campo eléctrico es nulo y el potencial constante

Un hecho muy importante de este fenómeno es la redistribución superficial de carga sucede de manera que en el interior del conductor el campo es nulo y todo su volumen equipotencial. Nota que, desde este punto de vista, no importa que el cuerpo sea un cascarón o macizo.

En esta propiedad de los conductores se basa el llamado blindaje eléctrico o protección electrostática, también llamado “efecto Faraday” que tiene múltiples aplicaciones prácticas, por ejemplo, para minimizar los efectos de campos externos en la transmisión de las señales de TV por cable se utilizan cables, en los que uno de los conductores se diseña en forma de malla cilíndrica, separada del otro por un material aislante (figura 3.60).



Fig. 3.60 Partes de un cable coaxial blindado

Dos situaciones espectaculares relacionadas con el efecto o jaula de Faraday se muestran en la figura 3.61.



Fig. 3.61 A pesar de la enorme energía involucrada en el proceso de una descarga atmosférica que impacte sobre un automóvil o avión, en el interior de estos el campo eléctrico es nulo y sus ocupantes estarán protegidos

Comprueba tus conocimientos

- 34.** ¿Cómo depende de la forma de un conductor cargado la intensidad del campo eléctrico en su superficie?
- 35.** Explica cómo surgen los rayos.
- 36.** ¿Por qué los pararrayos terminan en forma de punta?

3.8 Capacidad y capacitores. Dieléctricos en un campo electrostático

Conocemos que el potencial de un cuerpo conductor esférico de radio R está dado por la ecuación:

$$\varphi = k \frac{q}{R}$$

Esta ecuación nos indica que conductores esféricos con igual carga y diferente radio adquieren potenciales diferentes: a mayor radio menor potencial.

En general, el potencial que adquiere un conductor cuando es cargado depende de sus dimensiones y forma, siendo la relación entre el valor de la carga y el potencial una constante que caracteriza a cada cuerpo conductor, denominada **capacidad del conductor**.

Si designamos a esta magnitud por la letra C se tiene entonces que:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad 3.19$$

En el SI la unidad de capacidad se denomina farad y se simboliza por la letra F , de manera que:

$$1,0 \text{ F} = \frac{1,0 \text{ C}}{1,0 \text{ V}}$$

En la práctica es muy frecuente expresar la capacidad en las unidades derivadas:

microfaradio ($1,0 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$),

nanofaradio ($1,0 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$) y

picofaradio ($1,0 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$).

Pues el farad es una unidad relativamente grande. Por ejemplo, para que una esfera conductora tenga una capacidad de $1,0 \text{ F}$ debe tener un diámetro del orden de la Tierra.



De la historia

En 1746, el físico holandés, Pieter van Musschenbroek que trabajaba en la Universidad de Leiden, efectuó un experimento para comprobar si una botella llena de agua podía almacenar cargas eléctricas. A esta botella se le atravesó una varilla metálica que quedó sumergida en el líquido. La varilla tiene una forma de gancho en la parte superior al cual se le acerca un conductor cargado eléctricamente. Años más tarde se reemplazó el líquido por hojas de estaño, quedando desde entonces esta configuración de la botella que se utiliza actualmente para almacenar cargas eléctricas. Hoy se considera a la "Botella de Leyden" (figura 3.62) como el primer tipo de capacitor construido.



Fig. 3.62

Sin embargo, se pueden crear sistemas compuestos por dos o más conductores, separados por un material dieléctrico, de una gran capacidad y dimensiones pequeñas. Tales sistemas, que son muy empleados en los circuitos eléctricos y electrónicos para almacenar gran cantidad de energía eléctrica (por ejemplo, para hacer funcionar el flash de las cámaras fotográficas, los equipos de reanimación cardiopulmonar) y para muchos otros tipos de aplicaciones reciben el nombre de **capacitores**.

Por su capacidad, forma y tamaño los capacitores pueden ser de diferentes tipos. En la figura 3.63 se muestran algunos capacitores utilizados en los circuitos eléctricos y electrónicos.

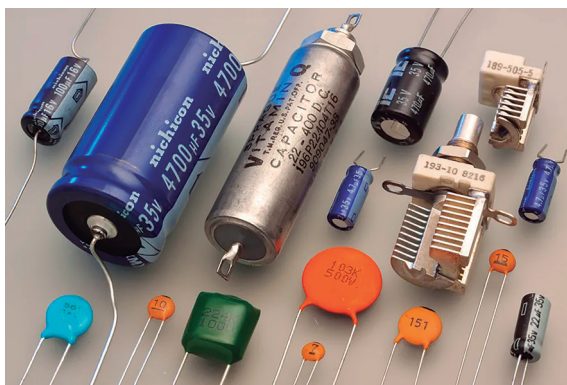


Fig. 3.63 Muestra de algunos tipos de capacitores empleados en circuitos eléctricos y electrónicos

La capacidad de un capacitor se define como la relación entre el módulo de la carga de una de sus placas y la diferencia de potencial entre ellas:

$$C = \frac{|q|}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad 3.20$$

El capacitor más sencillo, llamado capacitor plano, consiste en un par de placas conductoras separadas una distancia muy pequeña (figura 3.64 a).

Cuando las placas se cargan, para lo que basta con electrizar una de ellas o, lo que es más práctico, conectarlas a una batería (figura 3.64 b), se establece un campo electrostático entre las placas. La energía que se almacena en este campo es el resultado del trabajo realizado para cargar las placas y de ello dependerá la diferencia de potencial que se establezca entre estas.

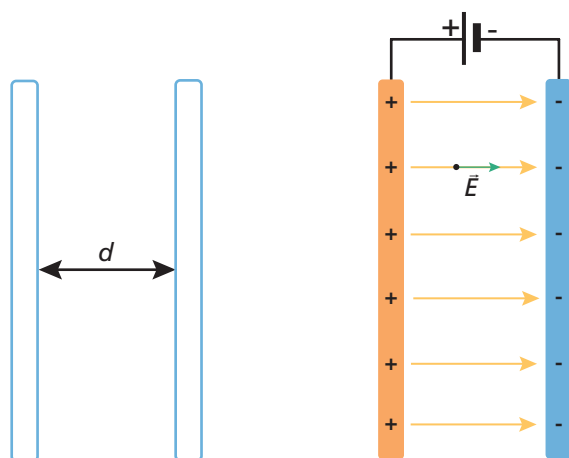


Fig. 3.64 a) esquema de un capacitor plano; b) conexión de las armaduras a una batería

Para el caso de un capacitor plano resulta sencillo encontrar una expresión para el cálculo de su capacidad:

Como para un capacitor:

$$C = \frac{|q|}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

Si para un capacitor plano el campo electrostático entre las placas se puede considerar uniforme y la distancia que las separa es d , se tendrá que:

$$C = \frac{|q|}{Ed}$$

ya que $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$, pero $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ y $\sigma = \frac{q}{S}$, y S el área de las armaduras:

$$C = \frac{|q|}{\frac{qd}{\epsilon_0 S}}$$

Por lo tanto:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad 3.21$$

Nota que la capacidad, si el espacio entre las placas se puede considerar al vacío, solo **depende de la geometría del capacitor, en este caso del área de las placas y de la distancia que las separa.**

La mayoría de los capacitores tienen un material no conductor o dieléctrico entre sus placas conductoras que tiene varias funciones. Una de estas funciones es la de mantener separadas las placas conductoras, otra es permitir que entre las placas se pueda establecer una elevada diferencia de potencial sin que se produzca el paso de corriente (si están separadas por el aire, este se puede ionizar y establecerse una corriente entre las placas en forma de chispa eléctrica) y en tercer lugar la de poder construir capacitores de pequeño tamaño y muy alta capacidad. Examinemos esto último más detenidamente.

¿Qué sucede cuando se coloca un material dieléctrico entre las placas de un capacitor cargado?

Conocemos que cuando un material dieléctrico está bajo la influencia de un campo electrostático externo, sus moléculas se orientan ocasionando el fenómeno llamado polarización (figura 3.65). Como consecuencia de esto, dentro del dieléctrico aparece un campo electrostático de sentido contrario al campo externo (debilita al campo externo). Esto hace que para lograr la misma diferencia de potencial entre las placas sin la presencia del dieléctrico sea necesario aumentar la cantidad de carga en las placas. O sea, la capacidad del capacitor es mayor cuando entre las placas hay un dieléctrico y el aumento de la cantidad de carga en las placas depende de qué tan fácilmente se polarice el dieléctrico.

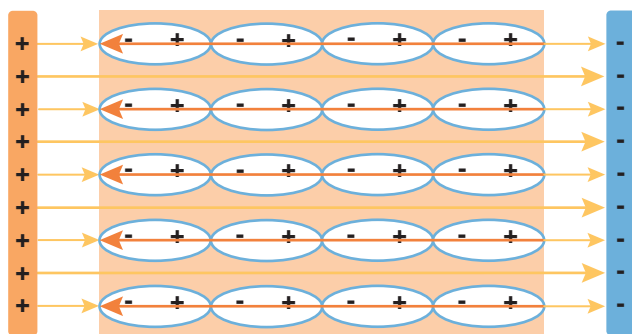


Fig. 3.65 Representación esquemática del fenómeno de la polarización. El campo resultante dentro del dieléctrico es menor que el campo externo

La magnitud física que caracteriza el grado de polarización de un material dieléctrico se denomina **permitividad**, se representa por la letra griega épsilon (ϵ) y su unidad de medida en el SI es el farad por metro ($F \cdot m$). En los materiales homogéneos e isotrópicos, esta magnitud es una constante característica del dieléctrico.

En la tabla 3.1 se pueden apreciar el valor de la permitividad para algunos materiales.

Tabla 3.1 Permitividad de algunos materiales

Material	ϵ (pF/m)	Material	ϵ (pF/m)
Aceite mineral	19,5	Caucho	De 20 a 50
Acetona	191	Madera	De 10 a 60
Aire	8,84	Papel duro	49,5
Agua destilada	81	PVC	De 30 a 40
Baquelita	De 50 a 80	Vidrio	De 40 a 60

Recordar que en la ley de Coulomb la permitividad en el vacío se denota por ϵ_0 y tiene el valor:

$$\epsilon_0 = 8,854\,187\,817\,6 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

La relación entre la **permitividad ϵ (absoluta)** de un dieléctrico y la permitividad del vacío ϵ_0 , se denomina **permitividad relativa (ϵ_r)**

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad 3.22$$

Esta es una magnitud adimensional (más rigurosamente: de magnitud de dimensión 1) que expresa cuantas veces mayor es el campo electrostático en

Aplicaciones

Entre las muchas aplicaciones de los capacitores está la de su empleo en los sensores para convertir cantidades físicas como presión, desplazamiento o humedad relativa en una señal eléctrica.

Por ejemplo: las teclas en el teclado de una computadora tienen en la base un pequeño capacitor variable. Cada una de las teclas (figura 3.67), tiene una placa metálica movable, montada sobre un émbolo asociado a la tecla A, que actúa como la placa superior de un capacitor B. Entre las dos placas metálicas se coloca un dieléctrico C. Al oprimir

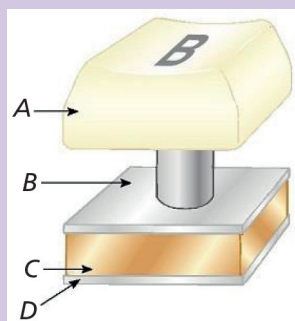


Fig. 3.67

la tecla, la separación entre la placa superior y la inferior D, que se encuentra fija, disminuye y la capacidad aumenta. El cambio en la capacidad dispara el circuito electrónico con lo que se procesa la información en la computadora

Problema resuelto 3.9

Una esfera conductora de 10 cm de radio se carga con $8,0 \mu\text{C}$. Si se su-
pone en el vacío:

- Calcula el potencial de la esfera.
- Determina la capacidad de la esfera.

Solución:

El potencial de la esfera se puede calcular directamente a partir de la ecuación:

$$\varphi = k \frac{q}{R}$$

Sustituyendo por los valores numéricos expresados en las unidades fundamentales se obtiene que:

$$\varphi = \left(9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{8,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{0,1 \text{ m}} = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V}$$

La capacidad de la esfera estará dada por:

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Sustituyendo por los valores numéricos expresados en las unidades fundamentales se obtiene que:

$$C = \frac{8,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{7,2 \cdot 10^4 \text{ V}} \approx 10 \text{ nF}$$

Problema resuelto 3.10

Calcula la capacidad de un capacitor plano cuyas placas de 100 cm^2 de área, están separadas $0,001 \text{ mm}$. Considera que la permitividad relativa o constante dieléctrica del material es 3 (mica).

Solución:

La capacidad de un capacitor plano está dada por:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$$

Por lo tanto, para calcularla basta con sustituir por lo valores numéricos expresados en las unidades fundamentales:

$$C = \frac{3(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2)}{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \approx 265,5 \text{ nF}$$

Comprueba tus conocimientos

- 37.** ¿A qué se llama capacidad? En particular, ¿a qué se llama capacidad de un capacitor?
- 38.** Explica el significado de la siguiente expresión:

$$C = \frac{\mu_0 S}{d}$$

- 39.** Un capacitor de placas paralelas tiene placas circulares de $8,22 \text{ cm}$ de radio y $1,31 \text{ cm}$ de separación. Si se supone que entre las placas se ha hecho el vacío.
 - a) Calcula la capacidad del capacitor.
 - b) ¿Qué carga aparecerá en las placas si se aplica una diferencia de potencial de 116 V ?

3.9 Energía almacenada en el campo electrostático. Acoplamiento de capacitores

En el proceso de carga de un capacitor sus armaduras se cargan con la misma cantidad de carga, pero de signo contrario, hasta que la diferencia de potencial sea igual a la tensión de la fuente (figura 3.68 a). La carga en el condensador es igual a la capacidad por la diferencia de potencial entre las armaduras ($q = C \cdot U$). La energía entregada por la fuente para cargar

el condensador se encuentra almacenada en el campo electrostático existente entre las armaduras.

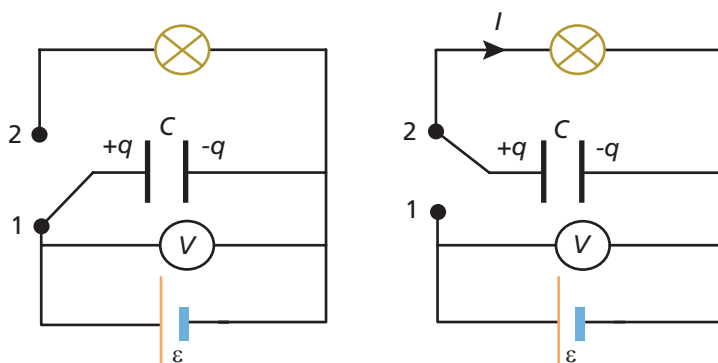


Fig. 3.68 Proceso de carga de un capacitor: a) en paralelo con la fuente, durante el proceso de la carga de sus placas; b) en serie con la lámpara, durante la descarga de sus placas

Lo anterior se evidencia cuando el capacitor es conectado a la lámpara del circuito (figura 3.68 b), que se ilumina por un tiempo hasta que el capacitor se descarga completamente. La corriente que circula por la lámpara se debe al movimiento de los portadores de la carga que se encontraban en las armaduras del condensador.

¿Qué energía se transfirió del condensador a la lámpara?

Del condensador pasó la energía eléctrica que se almacenó como resultado del proceso de la carga por la fuente.

Es decir, para cargar un capacitor la fuente realiza trabajo, el cual queda almacenado en forma de energía potencial electrostática. Si representamos dicho proceso en la gráfica de la figura 3.69, el área diagramática bajo la curva representa la energía almacenada en el capacitor y es numéricamente igual al trabajo W que se realiza para cargarlo. Por tanto, como W representa el área del triángulo podemos escribir:

$$W = \frac{1}{2} q(\varphi_A - \varphi_B) \quad 3.25$$

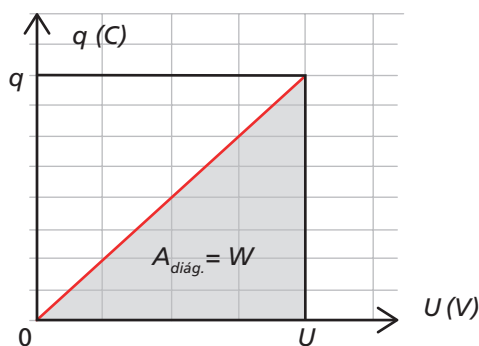


Fig. 3.69 El área diagramática del triángulo es igual al trabajo de la fuente eléctrica para cargar al capacitor que se convierte en energía eléctrica almacenada

De la ecuación $C = \frac{q}{(\varphi_A - \varphi_B)}$ se tiene que: $q = C (\varphi_A - \varphi_B)$ y al sustituirla en la ecuación 3.25 se obtiene que la energía potencial almacenada en campo eléctrico entre las placas del capacitor se determina como:

$$E_{pe} = \frac{1}{2} C U^2 \quad 3.26$$

Donde U es igual a $(\varphi_A - \varphi_B)$

Si se tiene en cuenta que $U = \frac{q}{C}$, la ecuación 3.26 se puede escribir como:

$$E_{pe} = \frac{q^2}{2C} \quad 3.27$$

Acoplamiento de capacitores

Los circuitos de la mayoría de los equipos tienen más de dos capacitores asociados entre sí, que pueden estar conectados en paralelo, en serie u otras combinaciones. Analizaremos que sucede con la capacidad de ellos cuando están conectados en paralelo y en serie. En la figura 3.70, se muestra tres capacitores que están conectados en paralelo y se les ha aplicado determinada diferencia de potencial entre los puntos A y B. Como la capacidad de cada uno de ellos es diferente, entonces a partir

de la ecuación $q = C \cdot U$ se puede establecer que la carga almacenada en cada uno; se puede calcular como:

$$q_1 = C_1(\varphi_A - \varphi_B); \quad q_2 = C_2(\varphi_A - \varphi_B)$$

$$q_3 = C_3(\varphi_A - \varphi_B)$$

Entonces la carga total q almacenada en un capacitor equivalente es:

$$q = q_1 + q_2 + q_3,$$

Si sustituimos q_1 , q_2 y q_3 en la expresión anterior queda:

$$q = (C_1 + C_2 + C_3) (\varphi_A - \varphi_B);$$

De la definición de capacidad $C = \frac{q}{U}$ queda:

$$\frac{q}{(\varphi_A - \varphi_B)} = C_1 + C_2 + C_3$$

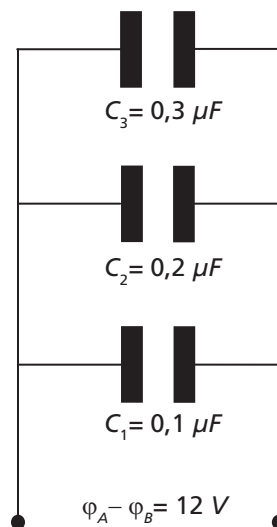


Fig. 3.70 Acoplamiento de condensadores en paralelo

Como el miembro izquierdo de la expresión anterior es la capacidad equivalente de los tres capacitores acoplados, que llamaremos C_T , podemos establecer que:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Podemos inferir entonces que para una asociación en paralelo de n capacitores se puede escribir:

$$C_T = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad 3.28$$

En un acoplamiento de capacitores en paralelo, la capacidad equivalente es igual a la suma de las capacidades de cada uno.

Si en un circuito se acoplan tres capacitores en serie y se les somete a una diferencia de potencial entre los puntos A y D como se muestra en la figura 3.71, la diferencia de potencial en cada uno de ellos será diferente, pero quedan cargados con la misma carga q .

La diferencia de potencial en cada capacitor se puede expresar como:

$$(\varphi_A - \varphi_B) = \frac{q}{C_1}$$

$$(\varphi_B - \varphi_C) = \frac{q}{C_2}$$

$$(\varphi_C - \varphi_D) = \frac{q}{C_3}$$

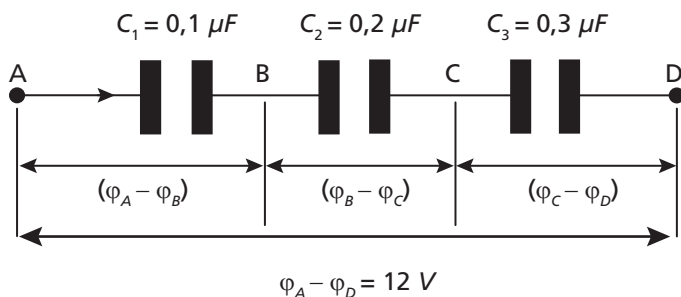


Fig. 3.71 Acoplamiento de condensadores en serie

Como la diferencia de potencial entre los puntos A y D es la suma de las correspondientes a cada capacitor se puede escribir:

$$(\varphi_A - \varphi_D) = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Según la definición de capacidad podemos escribir que:

$$\frac{(\varphi_A - \varphi_D)}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3},$$

Finalmente podemos plantear que:

$$\frac{(\varphi_A - \varphi_D)}{q} = \frac{1}{C_T}$$

Entonces para el acoplamiento de capacitores en serie podemos concluir:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Si un circuito posee n capacitores conectados en serie, la capacidad equivalente será igual a:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad 3.29$$

Para un sistema de capacitores conectados en serie, el inverso de la capacidad es igual a la suma de los inversos de las capacidades de cada uno de ellos.

Aplicaciones

Los capacitores permiten almacenar energía que después puede ser transferida en un breve intervalo de tiempo. Si se tiene un sistema de capacitores asociados entre sí la capacidad total equivalente dependerá de su conexión en serie o en paralelo. Si se necesita que la capacidad equivalente sea menor que la de los capacitores (cuestión que casi nunca sucede)



Fig. 3.72

se conectan en serie. Si se desea aumentar la carga eléctrica almacenada se conectan en paralelo. Uno de los casos más extremos de los valores que se pueden almacenar con ayuda de capacitores conectados de esta forma es en la máquina Z mostrada en la figura 3.72, el generador de rayos X más grande del mundo que se encuentra ubicada en Nuevo México, Estados Unidos. Esta máquina es capaz de crear condiciones extremas que coinciden con las detonaciones de las bombas nucleares, los reactores de fusión y los centros de las estrellas, siendo la única manera, de medir cómo se comporta la materia en estas condiciones. Su funcionamiento se basa en un proceso en el que se descargan los **2 160 capacitores conectados en paralelo** que tiene la máquina. En un intervalo de tiempo de solo 10^{-7} s, se descargan estos capacitores produciendo gran cantidad de energía y temperaturas que pueden alcanzar los millones de grados Kelvin. Aunque la cantidad de energía liberada es enorme en comparación con la energía que llega a consumir, esta no se puede aprovechar debido al corto intervalo de tiempo en que se produce. Con ayuda de esta máquina es posible saber cómo se formó el manto terrestre y comprender lo que ocurre en el interior de los agujeros negros.

Hora del laboratorio

Práctica de laboratorio 3.1

Estudio de la descarga de capacitores

Objetivo. Estudiar la forma en que se descarga un condensador en un circuito resistivo.

Materiales. Capacitor, cronómetro, fuente de corriente, cables de conexión, interruptor multímetro conectado como amperímetro en la escala de voltímetro, se conoce que la resistencia interna del voltímetro es grande.

Descripción y tareas. Montar un circuito donde se conecte el condensador a una fuente de corriente el condensador y el voltímetro, como se muestra en la figura 3.73, medir los valores de la corriente (tensión en su

resistencia interna) que marca el voltímetro y con esos valores construir una gráfica de $U = f(t)$.

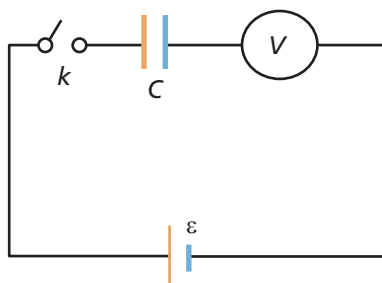


Fig. 3.73

Comprueba tus conocimientos

40. Un capacitor plano se carga usando una batería y después se desconecta de esta. Si en estas condiciones se introduce entre las armaduras una placa de dieléctrico, describe cualitativamente qué le ocurre a la carga eléctrica, a la capacidad, a la diferencia del potencial y a la intensidad del campo electrostático en el capacitor.
41. ¿Cómo conectarías dos capacitores (en serie o en paralelo) para que la capacidad total sea la mayor posible? Argumenta.

Tareas generales del capítulo

1. Determina la fuerza de interacción entre el electrón y el protón en el núcleo del átomo de hidrógeno, si la distancia entre ellos es igual a $5,0 \cdot 10^{-9}$ cm.
2. Se dispone de una esfera conductora cargada, aislada y apoyada sobre una varilla plástica. En un punto alrededor de ella, se ha colocado otro objeto cargado eléctricamente suspendido de un hilo (péndulo), el cual se desvía de su posición en la forma en que se ilustra en la figura 3.74. Responde:
 - a) ¿Por qué el péndulo se desvía de su dirección vertical?
 - b) ¿Cuál es el signo de la carga eléctrica que porta la esfera del péndulo? Argumenta.

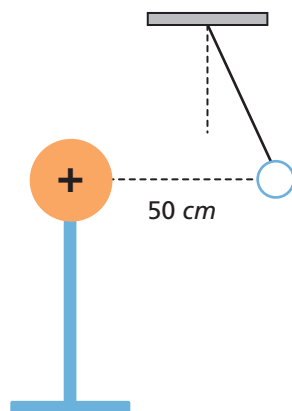


Fig. 3.74

- c) Representa en un diagrama de cuerpo libre las fuerzas que actúan sobre el péndulo.
- d) ¿Variará el ángulo que forma el hilo con la vertical, si la distancia a la esfera se reduce? Explica.
- e) Si la fuerza de interacción entre ambos cuerpos es 10^{-6} N, calcula el valor de la carga eléctrica que portan, suponiendo que es la misma.
3. En la figura 3.75 (I, II y III) se muestran distribuciones de partículas cargadas eléctricamente colocadas en reposo y en el vacío. A partir de los datos que se ofrecen, en cada una de ellas:

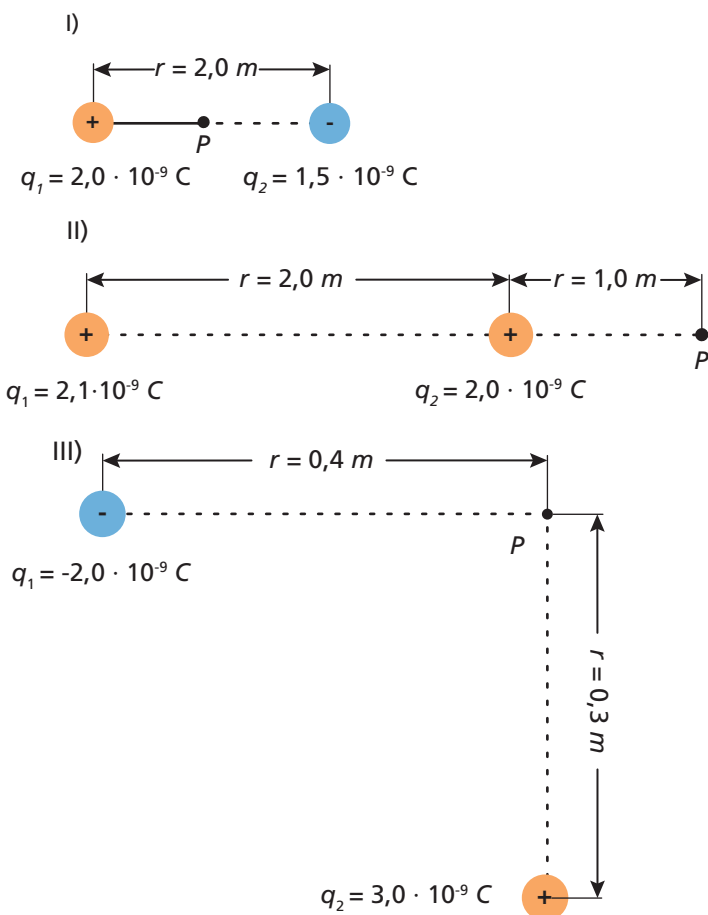


Fig. 3.75

- a) Determina de forma gráfica y analítica la fuerza de interacción entre las partículas.

- c) Determina de forma gráfica y analíticamente el valor de la intensidad del campo electrostático resultante en el punto P.
- d) Determina el valor de la fuerza resultante que actúa sobre un electrón que se coloque en el punto P.
7. La figura 3.78 muestra dos partículas cargadas eléctricamente en el vacío, separadas una distancia de 6,0 cm, y el vector intensidad de campo electrostático inherente a q_1 . El punto P representado dista 3,0 cm de la partícula q_2 .

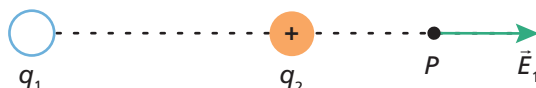


Fig. 3.78

- a) Identifica el signo de
- b) Representa la fuerza que se ejerce entre las partículas y determina su valor si se conoce que $|q_1| = |q_2| = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
- c) Determina el valor del vector intensidad del campo electrostático resultante en el punto P y represéntalo de forma gráfica.
- d) Determina el valor de la fuerza ejercida sobre una partícula cargada $q_3 = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ que se coloque en el punto P.
8. Dos partículas con carga q_1 y q_2 se encuentran en el vacío, en reposo y separadas como muestra la figura 3.79. Se ha representado la dirección y sentido del vector intensidad del campo electrostático inherente a q_1 en el punto P, que tiene un valor de $E_1 = 9,0 \text{ N/C}$.

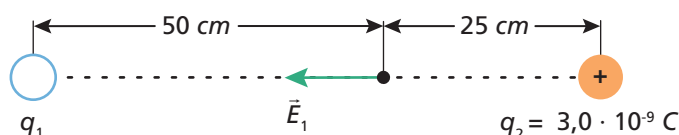


Fig. 3.79

- a) ¿Qué signo tiene la carga eléctrica de la partícula q_1 ?
- b) Determina el valor del vector intensidad de campo electrostático inherente a la partícula q_2 en el punto P.
- c) Determina el valor, dirección y sentido del campo electrostático resultante en el punto P.
9. **Desafío:** Una esfera conductora muy pequeña suspendida de un hilo aislante es usada para medir la intensidad de un campo eléctrico.

Cuando se le coloca en un campo cuya intensidad es $E_1 = 120 \text{ N/C}$ se observa que el hilo forma un ángulo de 45° con la vertical (figura 3.80 a). Determine el valor de la intensidad de un campo electrostático E_2 si el hilo se desvía un ángulo de 53° respecto a la vertical (figura 3.80 b).

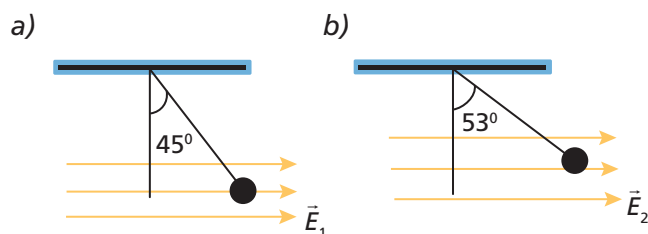


Fig. 3.80

10. Desafío: Una esferita de peso $4,0 \cdot 10^{-4}$, y carga eléctrica $q = -10^{-6} \text{ C}$ unida a un hilo se encuentra suspendida de un punto fijo, dentro de un campo eléctrico homogéneo de intensidad $\vec{E}$ (figura 3.81). Sabiendo que la esferita se encuentra en equilibrio, determina el valor de la intensidad del campo eléctrico $\vec{E}$.

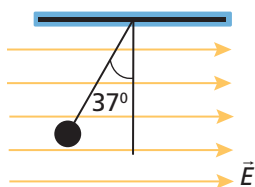


Fig. 3.81

11. Un cuerpo puntual tiene una carga eléctrica de $8,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ y se estudia su campo electrostático en los puntos A, B y C. Completa el cuadro con los valores correspondientes de r , $\vec{E}$ y φ .

Puntos	Distancia del cuerpo al punto $r(\text{m})$	Módulo de la intensidad $E(\text{N/C})$	Potencial $\varphi(\text{V})$
A	1		
B			36
C		8	

12. En la figura 3.82 se muestran las posiciones de dos cuerpos cargados eléctricamente. Determina en cada caso el potencial resultante en el punto P.

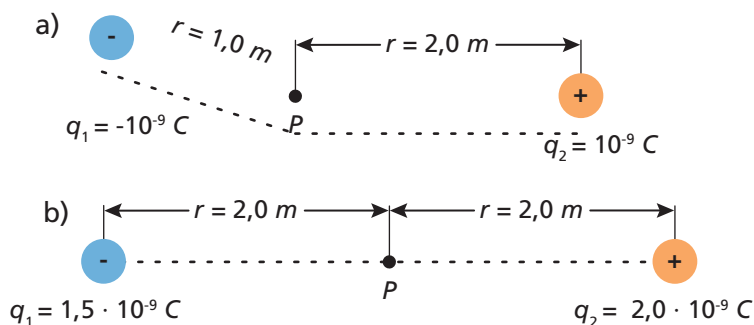


Fig. 3.82

13. Una partícula cargada eléctricamente ($q > 0$) se traslada por una trayectoria cerrada ABCDA, situada en el campo electrostático de la partícula electrizada q_1 en la figura 3.83. En qué tramo o tramos:

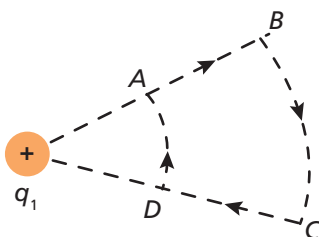


Fig. 3.83

- El trabajo realizado por el campo electrostático es positivo, negativo y nulo.
 - La energía potencial del sistema aumenta, disminuye y no varía. Argumenta tus respuestas.
14. La figura 3.84 representa superficies equipotenciales, entre las cuales se conoce la que la diferencia de potencial es de $4,0 \text{ V}$:

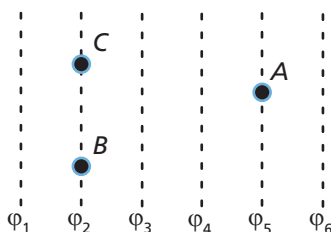


Fig. 3.84

- Representa la dirección y sentido del vector $\vec{E}$ en el punto A.
- Calcula la diferencia de potencial entre las superficies 1 y 3.

-

Fig. 3.85

c) Trabajo realizado por el campo electrostático al trasladar a la partícula 2 (manteniendo 1 fija):

- Desde el punto A hasta el punto B.
- Desde el punto A hasta el punto D.
- Desde el punto C hasta el punto D.
- Desde el punto A hasta el infinito.

d) Clasifica en los casos anteriores el trabajo realizado por el campo electrostático en motor, resistente o nulo.

Datos útiles: Potencial en I = 72 V, potencial en II = 36 V, potencial en III = 24 V

21. La diferencia de potencial entre las láminas de un capacitor plano es de 90 V el área de cada lámina es de 60 cm^2 y la carga eléctrica es de 10^{-12} C . Determina la distancia a la que se encuentran las láminas.
22. Si se duplica la diferencia de potencial aplicada a un capacitor, ¿en cuánto varía la energía eléctrica almacenada?
23. Si se elimina la mitad de la carga eléctrica que posee un capacitor, ¿qué fracción de su energía almacenada disminuye?
24. A dos capacitores conectados en serie se le aplica una diferencia de potencial de 300 V. Determina la diferencia de potencial entre las placas de cada capacitor, si sus capacidades son $2,0 \text{ pF}$ y $3,0 \text{ pF}$ respectivamente.
25. En la figura 3.86 se muestra la asociación de tres capacitores. Atendiendo a los datos ofrecidos en ella, determina el valor de:

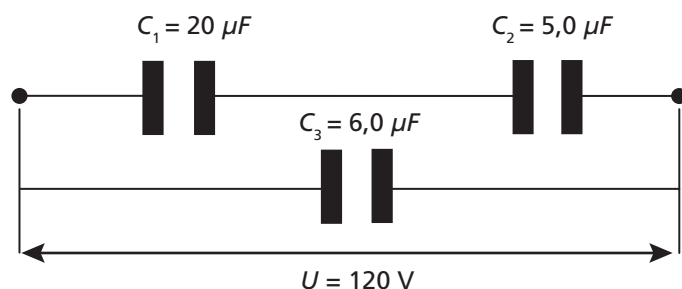


Fig. 3.86

- a) La carga eléctrica en cada capacitor.
- b) La diferencia de potencial en cada uno de ellos.

CAPÍTULO 4

Electricidad y magnetismo

En este tema se ampliarán y profundizarán los estudios precedentes sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos, muchos de los cuales conoces por su amplia presencia en nuestro entorno natural y construido. Estos contenidos además de ser muy importantes como base para estudios superiores o de otras disciplinas, lo son para la cultura general de todas las personas.

En particular, durante el estudio del tema se incluyen aplicaciones prácticas relacionadas con el diseño de circuitos eléctricos sencillos, el funcionamiento de algunos dispositivos electromagnéticos y la explicación de importantes fenómenos naturales.

Las vistosas auroras boreales (figura 4.1), el vuelo de muchas aves migratorias, los motores eléctricos y los generadores de electricidad, las imágenes de resonancia magnética, los equipos electrónicos de audio, video y comunicación, los dispositivos de refrigeración y climatización, los discos duros y otros soportes de información utilizados en computación, son solo algunos pocos ejemplos de fenómenos o dispositivos en los cuales está presente el magnetismo o, más propiamente dicho, el electromagnetismo.



Fig. 4.1 Auroras boreales

4.1 Corriente eléctrica. Intensidad de la corriente eléctrica. Tensión de una fuente o fuerza electromotriz

En sus apenas dos siglos de existencia la “electricidad” ha influido de manera extraordinaria en la vida de los seres humanos. Para percatarnos de esto basta pensar en cómo sería nuestra civilización si no se pudiera disponer de la electricidad.

Se puede considerar que la electricidad comienza a cobrar importancia, de forma acelerada, en nuestra la civilización a partir del año 1800, luego que el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) inventara la primera *pila eléctrica*.

Posteriormente fueron construyéndose dispositivos e instalaciones eléctricas de mucha mayor complejidad. Así, en los años 70 del siglo XIX se fabricaron las primeras lámparas incandescentes y en los 80 empezaron a utilizarse pequeñas centrales eléctricas para la iluminación. La radio, la televisión, las computadoras e Internet fueron creadas en el siglo XX.

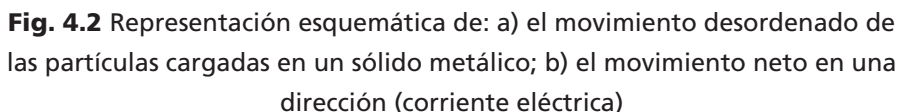
Para continuar el estudio sobre la corriente eléctrica puede resultar conveniente comenzar por recordar, precisar y ampliar algunas de nuestras ideas sobre esta temática. En particular: ¿A qué se le llama corriente eléctrica? ¿Cómo se define la magnitud “intensidad de corriente eléctrica”? ¿Cómo se genera la corriente eléctrica?

¿A que llamamos corriente eléctrica?

La palabra corriente, generalmente, se relaciona con el flujo o movimiento de algo en cierta dirección: corriente de agua, de aire, sanguínea, etcétera. De modo similar, *corriente eléctrica* significa flujo o movimiento de partículas cargadas en determinada dirección. En los sólidos metálicos pueden moverse los llamados electrones libres, pero en los gases, bajo ciertas condiciones, pueden desplazarse no solo electrones, sino además iones positivos y negativos (como en las descargas eléctricas atmosféricas y en las lámparas fluorescentes). En los líquidos conductores de la electricidad lo que fluye son iones (por ejemplo, durante la electrólisis).

Se denomina corriente eléctrica al movimiento neto de partículas cargadas en un medio conductor.

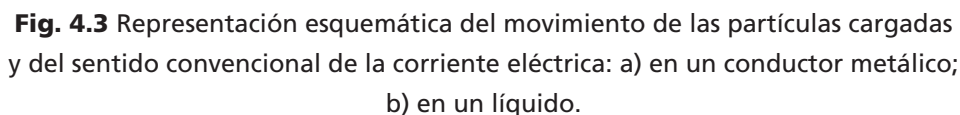
Recordemos que, aunque es algo que no se percibe de manera directa, las partículas que constituyen los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos, incluyendo sus electrones e iones, se encuentran siempre en un estado de



¿Cuál debe tomarse como sentido de la corriente, el de las partículas de carga negativa o el de las partículas de carga positiva?

Convencionalmente, se considera que el sentido de la corriente es el de las partículas con carga positiva.

De este modo, por ejemplo, en los conductores metálicos se asume que el sentido de la corriente es contrario al del movimiento de las partículas cargadas que realmente se mueven: los electrones. En los casos en que la corriente está constituida por partículas con cargas positivas y negativas, igual se asume que el sentido de la corriente es el de las partículas positivas y en ello se incluye la contribución de las partículas negativas, aunque estas se mueven realmente en sentido contrario (figura 4.3 b).



Intensidad de la corriente

Como ya conocemos, el hecho de que por un conductor exista corriente eléctrica significa que por el interior del conductor se mantiene un traslado neto de partículas cargadas.

Se denomina intensidad de la corriente eléctrica (I) a la cantidad neta de carga eléctrica que pasa a través de la sección transversal de un conductor en la unidad de tiempo.

Esto se puede expresar simbólicamente mediante la ecuación:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad 4.1$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo al cabo del cual pasa una cantidad de carga Δq por cualquier sección transversal del conductor.

En el SI la intensidad de corriente se mide en ampere (A) y es una de las unidades básicas o fundamentales de este sistema.

Debe notarse que cuando se dice que la intensidad de corriente por un conductor es de 1 A, esto significa que por cualquier sección transversal del conductor pasa una carga de un coulomb en cada segundo.

Debemos notar también que, aún cuando le asignamos una dirección y sentido, la magnitud intensidad corriente eléctrica es un escalar y no un vector. La flecha que se acostumbra a trazar para representarla solo indica el sentido del flujo de carga por el conductor. La intensidad de corriente no obedece a las leyes de composición de vectores, por ejemplo, si por un conductor la intensidad de corriente es I y en determinado punto, este conductor se bifurca en dos (figura 4.4) la intensidad de la corriente I es igual a $I_1 + I_2$, como consecuencia directa de la ley de conservación de la carga. La magnitud vectorial relacionada con la intensidad de corriente que refleja el sentido del movimiento de las partículas cargadas se denomina densidad de corriente y se acostumbra a estudiar en cursos más avanzados.

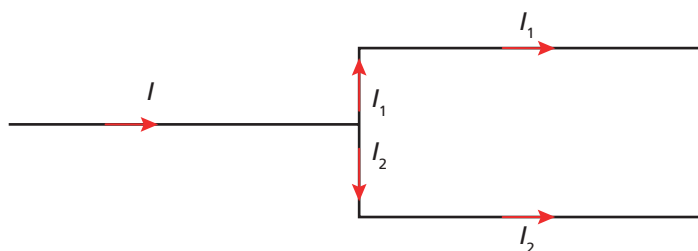


Fig. 4.4 La corriente de intensidad I se bifurca por las dos ramas de forma tal que $I = I_1 + I_2$, es decir, las corrientes se suman o restan de manera algebraica

¿Sabías que...?

¿Rápidos o lentos?

Cuando se cierra el interruptor de una linterna el encendido de la lámpara es prácticamente instantáneo. Este hecho nos indica que la corriente comienza a circular también de forma prácticamente instantánea. Pero, ¿qué podemos decir sobre el valor de la velocidad del movimiento ordenado de los electrones por el circuito?

Consideremos que S es el área de la sección transversal del conductor por el que circula la corriente (figura 4.5), que la carga de cada partícula en movimiento es igual a q_0 (para el electrón $q_0 = -e$) y que la dirección del movimiento de las partículas es perpendicular a cualquier sección transversal del conductor.

En estas condiciones, en el volumen ($S\Delta l$) limitado por las secciones 1 y 2 hay entonces ($n_0 S\Delta l$) partículas cargadas (electrones libres), donde n_0 es la concentración de las partículas. Por lo tanto, la carga total en dicho volumen será:

$$q = q_0 \cdot n_0 \cdot S \cdot \Delta l$$

Si las partículas se mueven de izquierda a derecha con una velocidad media de valor v , en un tiempo $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$ todas las partículas contenidas en el volumen analizado pasaran a través de la sección 2. Por tanto:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q_0 \cdot n \cdot S \cdot \Delta l}{\frac{\Delta l}{v}}$$

$$I = q_0 n S v$$

4.2

De esta ecuación se obtiene que:

$$v = \frac{I}{q_0 n S}$$

Sustituyendo en esta ecuación los valores típicos, por ejemplo, para el caso de una lámpara conectada a una batería mediante alambres de cobre:

$$v = \frac{0,1 \text{ A}}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(10^{29} \text{ m}^{-3})(3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2)} = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Como se puede apreciar el valor medio de la velocidad del movimiento ordenado de los electrones es muy pequeño, cosa nada paradójica, pues lo que sucede es que todos los electrones que participan en el proceso de conducción comienzan a moverse de forma prácticamente simultánea (¿por qué?).

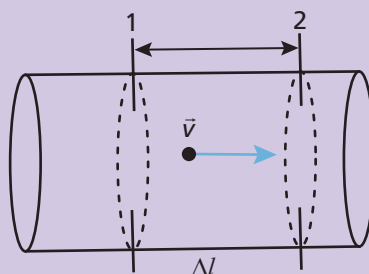


Fig. 4.5 Movimiento de un portador de carga entre dos sectores de un conductor

Tensión de la fuente o fuerza electromotriz (fem)

¿Cómo se genera la corriente eléctrica?

Las experiencias que conocemos sobre la electrización de los cuerpos sugieren que un procedimiento simple podría consistir en transmitir carga eléctrica a un cuerpo metálico (A), el cual después se une a otro (B) mediante un conductor. Este conductor funciona como una especie de guía de campo eléctrico, bajo cuya acción, los electrones, no obstante, su movimiento desordenado, se mueven hacia el cuerpo B. Desde el punto de vista de la energía, ocurre una transformación de energía potencial eléctrica (debida a la acumulación de partículas eléctricas en A) en energía cinética de las partículas cargadas. Sin embargo, en el caso descrito la corriente es de muy corta duración. Por eso se requiere utilizar algún dispositivo que, al mismo tiempo que transmite electrones al cuerpo A, los extrae del B. Esa es, en esencia, la función de las *fuentes* o *generadores* de electricidad.

En general, los dispositivos que utilizan determinado tipo de energía para mantener la corriente eléctrica en un conductor se denominan genéricamente fuentes o generadores de corriente.

Durante los siglos XVIII y XIX se idearon varios mecanismos basados en la electrización por frotamiento (denominados *máquinas electrostáticas*) que hacían esta función. Debido a las grandes pérdidas por rozamiento, la eficiencia de estas máquinas es extremadamente pequeña, logran transformar en energía eléctrica solo alrededor del 5 % de la energía mecánica invertida (figura 4.6).

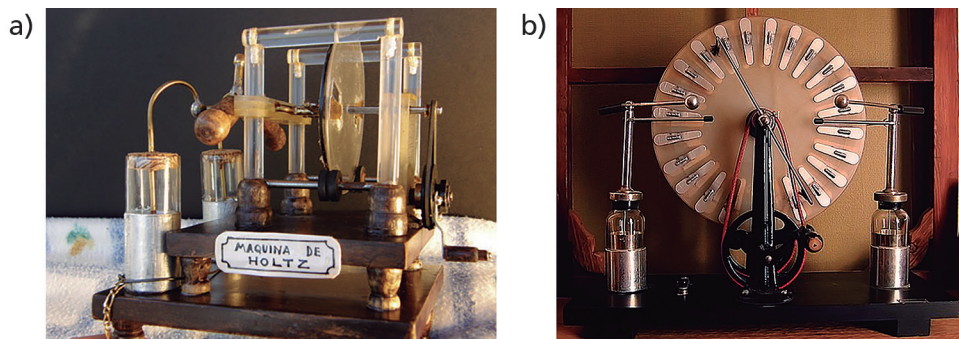


Fig. 4.6 Máquinas electrostáticas a) Máquina de Holtz desarrollada entre 1865 y 1867; b) Máquina desarrollada por el inventor británico James Wimshurst entre 1880 y 1883



De la historia

El 26 de julio de 1800 Alessandro Volta, físico italiano, presento a la Royal Society (real sociedad inglesa) su descubrimiento de la “pila Voltica”

Como ya conocemos, en el año 1800 fue inventada por Volta la primera pila eléctrica.

Su fundamento es el paso de partículas eléctricas de cierto cuerpo a otro de diferente material, al ponerlos en contacto mutuo. Por ejemplo, si en una disolución acidulada con sulfúrico se introduce una lámina de zinc, esta se electriza negativamente. Cuando en la misma disolución se introduce una de cobre, apenas se electriza. Por eso, si a continuación, el zinc y el cobre se unen mediante un conductor, se produce una corriente eléctrica. En las pilas electroquímicas, como la de Volta, tiene lugar la transformación de energía interna en energía de la corriente eléctrica mediante una reacción química. Si se desconecta el conductor que une los terminales, la reacción cesa. La pila de Volta fue precursora de las modernas pilas electroquímicas.

Además de las pilas electroquímicas, en la actualidad se ha extendido el uso de las *celdas solares*. Una explicación muy simplificada de su funcionamiento consiste en lo siguiente. Si se unen dos materiales apropiados (*semiconductores*), en la zona de contacto, uno se electriza negativamente y el otro positivamente. En consecuencia, al unir mediante un conductor sus extremos libres, fluirá una corriente eléctrica. La corriente se mantiene transmitiendo energía a la unión, al hacer incidir radiación solar sobre ella.

La corriente producida por las pilas, acumuladores y otros generadores, como los mencionados, se denomina **directa**. Estos generadores mantienen en sus terminales el mismo tipo de carga, positiva o negativa, por lo que al conectarlos a un conductor la corriente fluye siempre en un mismo sentido. A diferencia de ellos, en un enchufe habitual de 110 V de la red eléctrica doméstica o industrial, uno de los terminales (o los dos si es de 220 V) varía constantemente de positivo a negativo y viceversa, con cierta rapidez. En consecuencia, cuando se conecta algún equipo al enchufe, la corriente producida realiza *oscilaciones*, alternando entre un sentido y el otro. De ahí que esta corriente se denomine **alterna**. En Cuba y en general en América, la frecuencia de tales oscilaciones es de 60 Hz. En Europa la frecuencia suele ser de 50 Hz

En el interior de las fuentes las partículas cargadas se mueven, bajo la acción de fuerzas no coulombianas, contra la acción del campo eléctrico interno en la fuente. Como resultado, entre los bornes de la fuente se mantiene la diferencia de potencial y por el conductor externo se mantiene la corriente eléctrica (figura 4.7).

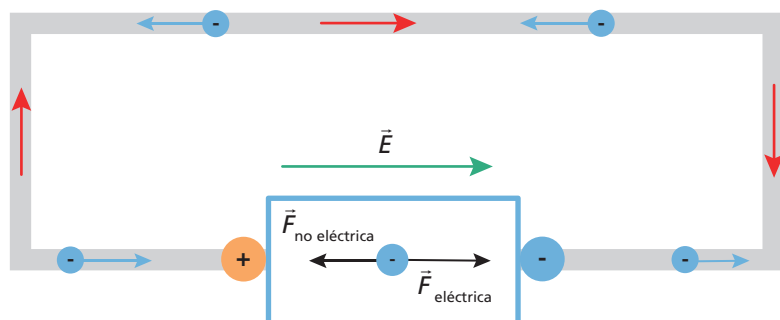


Fig. 4.7 En el interior de la fuente las partículas cargadas se mueven en dirección contraria a la fuerza del campo eléctrico, bajo la acción de fuerzas no coulombianas

El origen de las fuerzas no coulombianas puede ser muy diverso. Por ejemplo, en el caso de una pila de linterna o de una batería de automóvil, las fuerzas no coulombianas surgen como consecuencia de procesos químicos, en los generadores de las centrales eléctricas se deben al movimiento mecánico de una de sus partes en el seno de un campo magnético, proceso que se estudiará posteriormente.

La acción de las fuerzas no coulombianas se caracteriza por la magnitud tensión de la fuente U_{fuente} que expresa la diferencia de potencial que la fuente mantiene en sus terminales. Esto significa que la tensión de la fuente es igual al trabajo que hace la fuente (o la energía que ella suministra) para que una partícula de carga unitaria pueda mantenerse circulando por el conductor. De manera que:

$$U_{\text{fuente}} = \frac{W}{q} \quad 4.3$$

En muchos textos de Física y de electricidad a esta magnitud, por razones históricas, se le denomina fuerza electromotriz (ε) aunque no se trata de una fuerza. Como en lo adelante emplearemos indistintamente cualquiera de los dos términos, es importante señalar de que hay que tener presente lo dicho: el término fuerza electromotriz tiene un carácter histórico, no es una fuerza, sino energía o trabajo.

¿Sabías que ...?

- Una batería no suministra electrones al circuito, sino que establece el campo eléctrico externo que ejerce una fuerza sobre los electrones existentes en los alambres y en todos los demás elementos del circuito.
- Los efectos biológicos de la corriente eléctrica, que en general están relacionados con los químicos y térmicos, son también muy comunes e importantes.

En este sentido debe señalarse que los efectos de la corriente sobre el organismo humano (también sobre otros seres vivos) pueden ser muy desagradables e incluso mortales y por ello los dispositivos eléctricos deben ser instalados y manipulados con cuidado y conforme con las indicaciones de los suministradores.

La gravedad de estos efectos depende de la **intensidad** de la corriente de las **partes** del cuerpo por las que circula y la **duración** del paso de la corriente.

Algunos de estos efectos pueden ser los siguientes:

Tetanización o contracción muscular. Consiste en la anulación de la capacidad de reacción muscular que impide la separación voluntaria del punto de contacto (los músculos de las manos y los brazos se contraen sin poder relajarse). Normalmente este efecto se produce cuando se superan los 10 mA.

Asfixia: se produce cuando la corriente eléctrica atraviesa el tórax. El choque eléctrico tetaniza el diafragma torácico y como consecuencia de ello los pulmones no tienen capacidad para aceptar aire ni para expulsarlo. Este efecto se produce a partir de los 25 mA aproximadamente.

Quemaduras Internas o externas por el paso de la intensidad de corriente a través del cuerpo por Efecto Joule o por la proximidad al arco eléctrico. Se producen zonas de necrosis (tejidos muertos), y las quemaduras pueden llegar a alcanzar órganos vecinos profundos, músculos, nervios e incluso a los huesos. La considerable energía disipada por efecto Joule, puede provocar la coagulación irreversible de las células de los músculos estriados e incluso la carbonización de estas.

Fibrilación ventricular: se produce cuando la corriente pasa por el corazón y su efecto en el organismo se traduce en un paro circulatorio por rotura del ritmo cardíaco. Lo que sucede es que el corazón no puede funcionar de forma coordinada y en consecuencia no se bombea sangre a los diferentes tejidos del cuerpo humano. Ello es particularmente grave en los tejidos del cerebro donde es imprescindible una oxigenación continua. Se presenta con intensidades del orden de 100 mA y es reversible si el tiempo de contacto es inferior a 0,1 s. La fibrilación se produce cuando el choque eléctrico tiene una duración superior a 0,15 s.

Lesiones permanentes: producidas por destrucción de la parte afectada del sistema nervioso (parálisis, contracturas permanentes, etcétera.)

Comprueba tus conocimientos

1. Si por la sección transversal de un conductor pasa una carga de:
 - a) 45 C en 18 s;
 - b) 1,0 C en 70 s;
 - c) 50 C en 12 s;
 Calcula la intensidad de la corriente en cada caso.
2. ¿Cuál será la carga de las partículas que atraviesan la sección transversal de un conductor en 10 s, si la intensidad de la corriente es 5,0 A?
3. ¿A qué se denomina fuerza electromotriz? ¿Cómo se calcula?
4. ¿Qué significa que la *fem* de una batería sea de 12 V?
5. ¿Varía la *fem* de un elemento galvánico al cerrar el circuito?

4.2 Ley de Ohm para un circuito completo. Acoplamiento de las fuentes. Reglas de Kirchhoff para circuitos eléctricos

Ley de Ohm para un circuito completo

Recordemos que dos de las formas más elementales de conectar los componentes consumidores en un circuito son las mostradas en las figuras 4.8 y 4.9. El primer tipo de conexión (figura 4.8), en que el voltaje es el mismo en los terminales de todos los dispositivos, se denomina conexión en paralelo. El segundo tipo (figura 4.9), en que la intensidad de corriente es la misma, se denomina conexión en serie.

Cuando los resistores están *en serie*, si se desconecta alguno de ellos se interrumpe el paso de la corriente en todos. Cuando están *en paralelo*, si se desconecta alguno por los otros puede continuar fluyendo la corriente. También es importante recordar que si los componentes están conectados en serie su resistencia total es igual a la suma de las resistencias de cada uno de ellos y en el caso de que estén conectados en paralelo, el inverso de la resistencia total es igual a la suma de los inversos de las resistencias de cada componente. Por ejemplo, para los casos representados en las figuras 4.8 y 4.9 se tendría que:

Conexión en serie (figura 4.9): $R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$ 4.4

Conexión en paralelo (figura 4.8): $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ 4.5

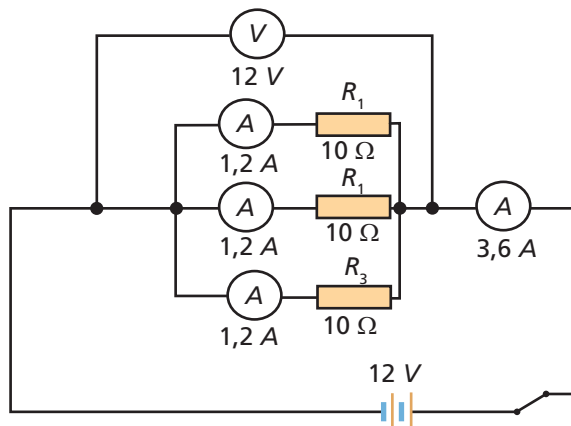


Fig. 4.8 Conexión en paralelo de los elementos de un circuito. Nota como el voltaje en todos los elementos es común y la intensidad total de la corriente es igual a la suma de las intensidades por cada uno de los elementos

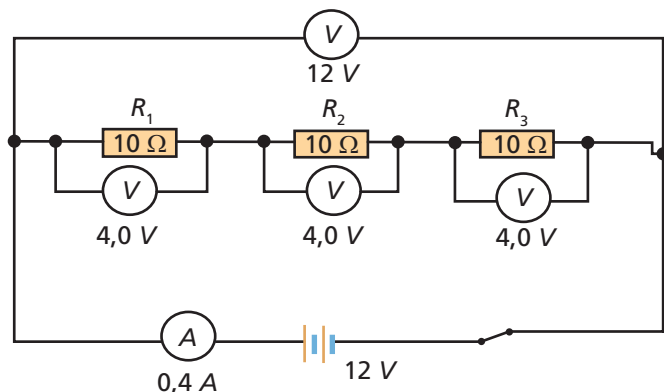


Fig. 4.9 Conexión en serie de los elementos de un circuito. Nota como la corriente que circula por todos los elementos es la misma y el voltaje total es la suma de los voltajes en cada uno de los elementos

Para el caso de un circuito completo, es decir, incluyendo la fuente de tensión, la ley de Ohm puede ser escrita de forma simbólica:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad 4.6$$

Donde:

I es la intensidad de la corriente por todo el circuito

ε es la tensión o *fem* de la fuente.

R es la resistencia total de los componentes conectados a la fuente

r es la resistencia interna de la fuente.



De la historia

Georg Simón Ohm, físico alemán (1789-1854), fue profesor de secundaria y posteriormente profesor en la universidad de Múnich

Cuando Ohm publicó por primera vez su trabajo las críticas lo rechazaron. Fue denominado “una red de fantasías desnudas”, y el ministro alemán de educación afirmó que un profesor que predicaba tales herejías no era digno de enseñar ciencia. El rechazo al trabajo de Ohm se debía a la filosofía científica que prevalecía en Alemania en esa época, la cual era liderada por Hegel, afirmaba que “no era necesario que los experimentos se adecuaran a la comprensión de la naturaleza, porque la naturaleza está tan bien ordenada, que la veracidad científica puede deducirse al razonar solamente”.

Si la resistencia interna de la fuente es pequeña en comparación con la externa ($R \gg r$), no influye considerablemente sobre la intensidad de la corriente, por lo que la tensión (U) en los terminales del circuito externo es aproximadamente igual a la fuerza electromotriz ($\mathcal{E}$).

Si la resistencia externa es muy pequeña ($R \rightarrow 0$) la intensidad de la corriente se determina, específicamente, por medio de la resistencia interna de la fuente. En estos casos (corto circuito), I puede ser considerablemente grande, aun cuando la fuerza electromotriz sea pequeña. Si r es pequeña (en los acumuladores $R \approx 0,1 - 0,001 \, \Omega$ los conductores pueden fundirse y la fuente deteriorarse. En las máquinas electrostáticas (dispositivo que genera cargas eléctricas por fricción), por el contrario la resistencia del aislador de aire entre los discos es muy grande ($r \approx 10^7 - 10^8 \, \Omega$); debido a ello, aunque se generan fuerzas electromotrices mayores de $10^4 \, \text{V}$, la intensidad de la corriente en el circuito es prácticamente nula.

¡Cuidado!

Es conveniente puntualizar que la magnitud resistencia óhmica no varía en el circuito por cambios en los valores de la tensión y la intensidad de la corriente, ella depende solo de las características de los componentes.

Por ejemplo, recuerda que para los conductores metálicos la resistencia se calcula mediante la fórmula:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad 4.7$$

Donde l es la longitud del conductor, S el área de su sección transversal y ρ un parámetro, denominado resistividad, que depende de la naturaleza del conductor.

Acoplamiento de fuentes

Si un circuito posee varias fuentes acopladas en serie, por ejemplo ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_n entonces la fuerza electromotriz total será la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de cada elemento por separado. El signo que debe ser tomado para la suma dependerá de cómo se conecten las fuentes. Una forma para determinar el signo para cada una de las *fem* el siguiente: se elige de forma arbitraria un sentido

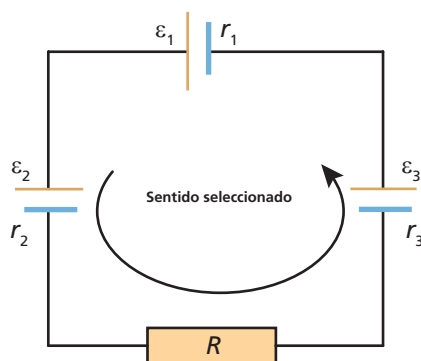


Fig. 4.10

para recorrer el circuito (figura 4.10) y si el sentido considerado va del polo negativo al polo positivo de la fuente, entonces $\varepsilon_n > 0$, en el caso contrario $\varepsilon_n < 0$.

De esta forma, por ejemplo, la *fem* total en el circuito que se muestra en la figura 4.9 será: $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

Si el resultado es negativo eso significa que el sentido de la corriente será contrario al asumido de manera arbitraria para recorrer el circuito

Si las fuentes son iguales y se acoplan en paralelo (figura 4.11), entonces la fuerza electromotriz es la misma que la de cada una de las fuentes.

Es importante recordar que la forma de conexión de los componentes de la fuente determina la resistencia interna total del conjunto de fuentes acopladas.

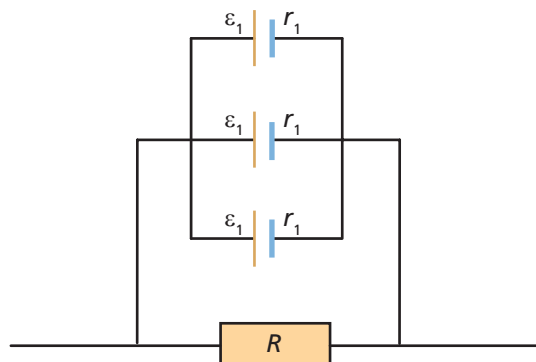


Fig. 4.11

Problema resuelto 4.1

Teniendo en cuenta los datos que se ofrecen en el diagrama del circuito representado en la figura 4.12 y que la resistencia interna de cada fuente es de $0,5 \Omega$, determina la:

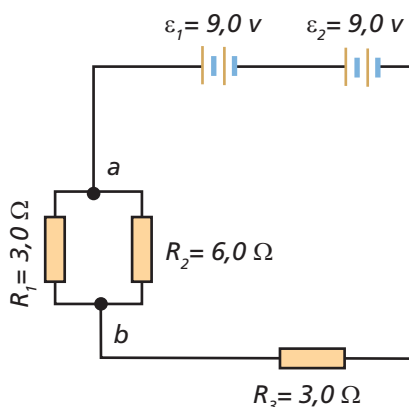


Fig. 4.12

- Resistencia equivalente de los resistores R_1 y R_2 .
- Resistencia total del circuito.
- Tensión total de las fuentes.
- Intensidad de la corriente en el circuito
- Diferencia de potencial entre los terminales a y b
- Intensidad de la corriente en los resistores R_1 y R_2 .
- Diferencia de potencial en el resistor R_3
- Diferencia de potencial interna en la combinación de fuentes.
- Diferencia de potencial en los terminales de la combinación de fuentes.
- Potencia disipada en el resistor R_3
- Energía disipada en el resistor R_3 al cabo de 3,0 s.

Solución:

- a) Cómo los resistores R_1 y R_2 están conectados en paralelo su resistencia equivalente R_{1-2} se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\frac{1}{R_{1-2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_{1-2}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$$

Por lo tanto:

$$R_{1-2} = 2,0 \Omega$$

- b) La resistencia externa del circuito estará dada por la resistencia equivalente del resistor R_{1-2} y R_3 . Como estos resistores están conectados en serie su valor estará dado por:

$$R_{1-2-3} = R_{1-2} + R_3$$

$$R_{1-2-3} = 2,0 + 3,0 = 5,0 \Omega$$

Para calcular la resistencia total hay que sumar a la resistencia externa la resistencia interna de las dos fuentes cuyo valor total es de $1,0 \Omega$. Por lo tanto la resistencia total del circuito R_T será:

$$R_T = 6,0 \Omega$$

- c) Cuando las fuentes están en serie su tensión total es la suma de las tensiones de cada fuente. Si recorremos el circuito en sentido antihorario la tensión de las dos fuentes será:

$$U_{\text{total fuentes}} = 9,0 \text{ V} + 9,0 \text{ V} = 18 \text{ V}$$

- d) En correspondencia con la ley de Ohm, la intensidad de la corriente en el circuito está dada por la ecuación:

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

Donde, en este caso U es la tensión de las dos fuentes y R la resistencia total del circuito, es decir, la ecuación debe ser escrita como.

$$I = \frac{U_{\text{total fuentes}}}{R_T}$$

Sustituyendo por los valores.

$$I = \frac{18 \text{ V}}{6,0} = 3,0 \text{ A}$$

- e) Aplicando la ley de Ohm se tiene que:

$$U_{ab} = I (R_{1-2}) = (3,0 \text{ A})(2,0 \Omega) = 6,0 \text{ V}$$

- f) La intensidad de la corriente por los resistores R_1 y R_2 se puede calcular aplicando la ley de Ohm a cada uno de ellos:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{6,0 \text{ V}}{3,0} = 2,0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{6,0 \text{ V}}{6,0} = 1,0 \text{ A}$$

- g) De igual forma, la diferencia de potencias en el resistor R_3 se puede calcular aplicando la ley de Ohm:

$$U_{R3} = (I) (R_3) = (3,0 \text{ A})(3,0 \Omega) = 9,0 \text{ V}$$

- h) La diferencia de potencial interna, en correspondencia con la ley de Ohm, será igual al producto de la intensidad de la corriente I que pasa por ellas por la resistencia equivalente de las dos:

$$U_{\text{interna fuente}} = I \cdot r_{\text{interna fuentes}} = (3,0 \text{ A})(1,0 \Omega) = 3,0 \text{ V}$$

- i) La diferencia de potencial en los terminales de la fuente U_{ext} es decir en la parte externa del circuito, de acuerdo con la ley de Ohm, estará dada por la intensidad de la corriente por el circuito I multiplicada por la resistencia equivalente del circuito externo R_{1-2-3} :

$$U_{\text{ext}} = (I) (R_{1-2-3}) = (3,0 \text{ A})(5,0 \Omega) = 15 \text{ V}$$

- j) Si recordamos que la potencia disipada en el resistor R_2 se puede calcular directamente a partir de la ecuación $P = I \cdot U$, tendremos que en este caso:

$$P = I \cdot U = I_2 \cdot U_{ab} = (1,0 \text{ A})(6,0 \text{ V}) = 6,0 \text{ W}$$

- k) Si recordamos también que la energía que se convierte en energía térmica que se disipa en un resistor se puede calcular mediante la fórmula $Q = I^2 R \cdot t$, tendremos que en este caso:

$$Q_3 = (I^2)(R_3)(\Delta t) = (9,0 \text{ A})(3,0 \Omega)(3,0 \text{ s}) = 81 \text{ J}$$

Problema resuelto 4.2

La tensión en los bornes de una fuente, con el circuito cerrado, es de 100 V. ¿Cuál es el valor de la *fem* si la resistencia externa es 5 veces mayor que la interna?

Solución:

Sabemos que $\varepsilon = U_r + U_R$. Ahora bien, según los datos del problema:

$$U_R = 100 \text{ V y } U_r = \frac{U_R}{5} = \frac{100 \text{ V}}{5} = 20 \text{ V}$$

Entonces:

$$\varepsilon = 100 \text{ V} + 20 \text{ V}$$

$$\varepsilon = 120 \text{ V}$$

Problema resuelto 4.3

En el circuito de la figura 4.13, determina el valor de la *fem* si la resistencia interna de la batería es $1,0 \Omega$, la tensión en los bornes de la fuente es de 30 V y $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \Omega$.

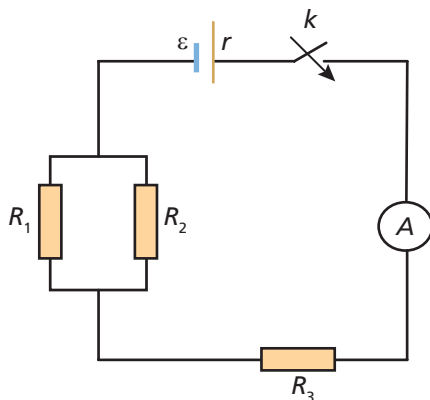


Fig. 4.13

Solución:

La ley de Ohm para un circuito completo plantea que:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Despejando:

$$\varepsilon = I(R + r)$$

Debemos calcular primero los valores de la resistencia externa del circuito y de la intensidad de la corriente.

Datos:

$$U_R = 30 \text{ V}$$

$$r = 1,0 \, \Omega$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \, \Omega$$

Ahora bien:

$$R = R_p + R_3$$

donde R_p , es la resistencia equivalente de R_1 , y R_2 , que están en paralelo.

Entonces:

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

Si sustituimos los valores de R_1 , R_2 y R_3 tendremos que:

$$R = 15 \, \Omega$$

el valor de I lo podemos obtener a partir de la ley de Ohm para una porción del circuito (considerando toda la parte externa).

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

$$I = \frac{30 \text{ V}}{15 \, \Omega}$$

y sustituyendo en la ecuación para ε , obtenemos:

$$\varepsilon = 2,0 \text{ A} (15 \, \Omega + 1)$$

$$\varepsilon = 32 \text{ V}$$

Hora del laboratorio

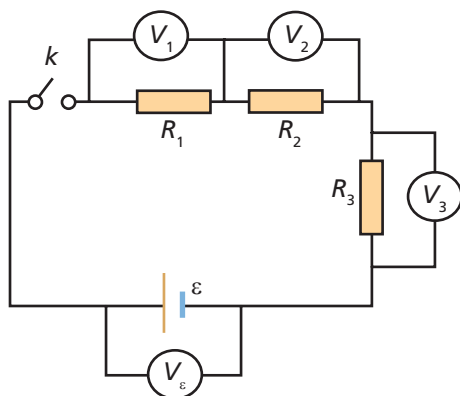
Ley de Ohm para un circuito completo

Objetivo. Estudiar la relación entre la intensidad de la corriente en un circuito con la *fem* de la fuente y la resistencia.

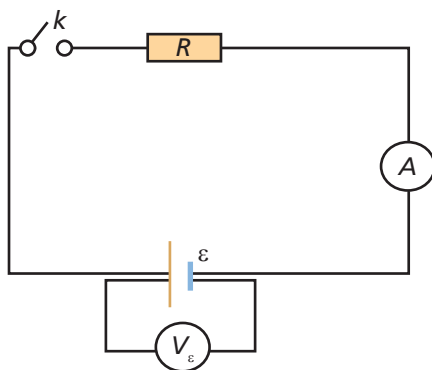
Materiales. Dos multímetros, una fuente de corriente directa, cables de conexión, tres resistencias de valores conocidos.

Descripción:

Tarea 1: construir un circuito donde aparezca la fuente y tres resistencias en serie (figura 4.14), comprobar que la suma de las caídas de tensión en cada resistencia es igual a la caída de tensión U_ε con el circuito cerrado $U_\varepsilon = U_1 + U_2 + U_3$.

**Fig. 4.14**

Tarea 2: construir un circuito para medir la caída tensión en la fuente U_ε y la intensidad de la corriente en el circuito I_R , al variar la resistencia R (figura 4.15). Construye la gráfica de $U_R = f(I_R)$, y determina el valor de la resistencia interna de la fuente r , así como el valor de la *fem* de la batería ε .

**Fig. 4.15****Reglas de Kirchhoff**

En general, las conexiones de los elementos en un circuito no pueden reducirse a simples asociaciones en serie, en paralelo o en serie-paralelo. Un ejemplo sencillo de este tipo de circuitos se muestra en la figura 4.16.

Estos circuitos se denominan circuitos ramificados o redes eléctricas y, para poder describirlos con más facilidad, resulta necesario introducir los términos siguientes:

Nodo: se le denomina así a cada punto de ramificación (A, B, C, D en el ejemplo de la figura 4.16). En general, en los nodos se conectan tres o más conductores.

Rama: son las conexiones entre dos nodos, con todos sus elementos.

Malla: se le denomina a cada contorno cerrado delimitado por dos o más ramas. En la figura 4.16 los contornos ABCA, ACDA y ABCDA constituyen cada uno de ellos una malla.

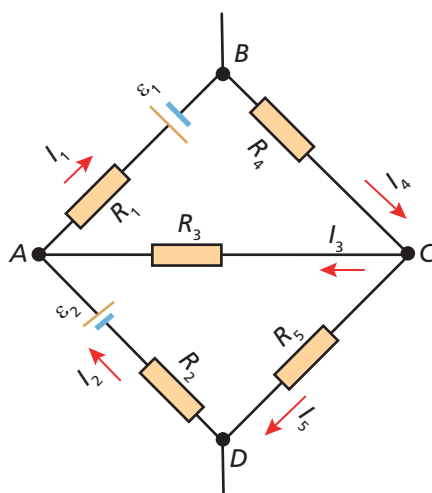


Fig. 4.16

Para calcular este tipo de circuitos, es decir, conocer los valores de intensidad de corriente, tensión y resistencia en sus diferentes componentes, no resulta necesaria ninguna nueva ley, pero algunos procedimientos ayudan a sistematizar y hacer más sencillos los cálculos necesarios. Veamos a continuación estos procedimientos, que fueron desarrollados por el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff.

De la historia

Gustav Kirchhoff (figura 4.17), Físico alemán (1824-1887), profesor de Heidelberg, entre otros aportes, junto con Robert Bunsen, inventó el espectroscopio e inició la espectroscopía. Descubrió el cesio y el rubidio e inventó la espectrografía astronómica.

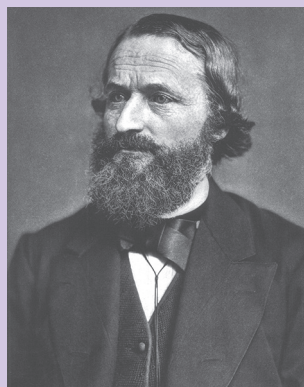


Fig. 4.17

Regla de Kirchhoff de los nodos

La suma algebraica de las intensidades de corriente corrientes en cualquier nodo es igual a cero. De manera simbólica:

$$\sum I = 0 \quad 4.8$$

Regla de Kirchhoff de las mallas

La suma algebraica de las diferencias de potencial en todos los componentes de cualquier malla, incluyendo las fuentes es igual a cero. De manera simbólica:

$$\sum U = 0 \quad 4.9$$

La regla de los nodos se basa en la *conservación de la carga eléctrica*. En un nodo no se puede acumular, generar o destruir carga eléctrica, por lo que la carga total que entra a ella por unidad de tiempo debe ser igual a la carga total que sale por unidad de tiempo.

La carga por unidad de tiempo es la intensidad de corriente, por lo tanto, si consideramos como positivas las corrientes que entran a una unión y negativas las que salen, la suma algebraica de las corrientes en la unión debe ser igual a cero.

La regla de las mallas es el enunciado de que la energía generada por las fuentes en una malla, en la unidad de tiempo, es igual a la energía consumida por el resto de los componentes de esa malla en la unidad de tiempo, es decir, una expresión de la ley de conservación de la energía.

Para utilizar esta regla es preciso establecer una convención para los signos de las diferencias de potencial: primero se indica un sentido arbitrario cualquiera para las corrientes en cada rama del circuito y luego se procede a recorrer las mallas en cualquier sentido. Al pasar por cada fuente si se hace del borne positivo al negativo (disminuye la tensión o voltaje) el signo de diferencia de potencial se toma como negativo y si se recorre del borne negativo al positivo (aumenta la tensión) el signo se toma como positivo. Al pasar por cada componente consumidor, si se hace en el mismo sentido de la corriente (disminución o caída de la tensión) el signo de la diferencia de potencial se toma como negativo y si se hace en sentido contrario a la corriente se toma (aumento o subida del potencial) se toma como positivo. En la figura 4.18 se muestra un resumen de estas reglas.

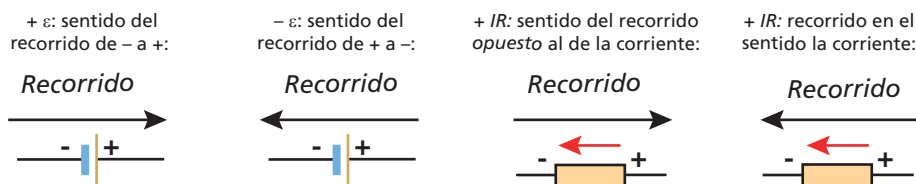


Fig. 4.18 a) convenio de sentido para las *fem*; b) convenio de sentido para los resistores

Se puede demostrar que se obtienen las ecuaciones necesarias para calcular cualquier red, si se escriben las ecuaciones para todos los nodos menos 1 y las ecuaciones de malla para todas las mallas independientes, siendo las mallas independientes todas las que contienen, al menos, un elemento o componente distinto del resto.

Analicemos ahora mediante un ejemplo sencillo (figura 4.19) como proceder en la práctica para aplicar estas reglas.

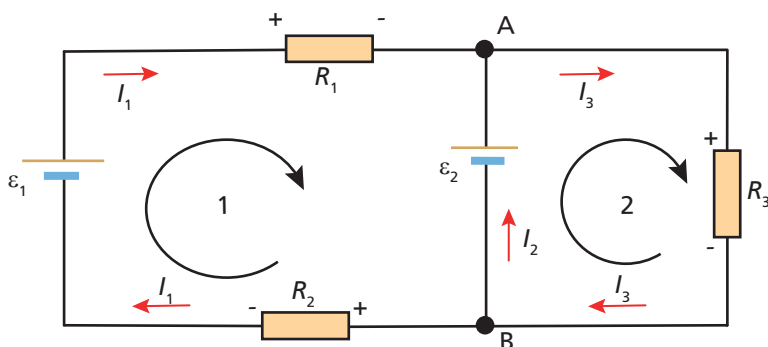


Fig. 4.19 Propuesta de recorrido en una malla, polaridad en los resistores

Como se puede apreciar, en el circuito hay dos nodos (A y B) y tres mallas, de las cuales dos son independientes. En este caso se han señalado como independientes la 1 y la 2, pero igual se pueden tomar una de estas dos y la integrada por la fuente 1 y los resistores 1, 2 y 3.

En el circuito se han señalado, de forma arbitraria, las corrientes (I_1 , I_2 e I_3) por cada rama y el sentido seleccionado para recorrer las mallas.

Como hay dos nodos se debe aplicar la primera regla para establecer la ecuación de uno de los nodos (por ejemplo, para el A) y la segunda regla para las mallas independientes 1 y 2. Por ejemplo, para el nodo A se tendrá que:

Ecuación para el nodo A: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

Ecuación para la malla 1: $\varepsilon_1 - I_1 \cdot R_1 - \varepsilon_2 - I_1 \cdot R_2 = 0$

Ecuación para la malla 2: $\varepsilon_2 - I_3 \cdot R_3 = 0$

Como se puede apreciar se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, (I_1 , I_2 e I_3) lo que permite calcular estos valores y si se quiere, utilizando la ley de Ohm, calcular también las diferencias de potencial en cada resistor.

Puede ser conveniente señalar que si alguno de los valores de las intensidades se obtiene con signo negativo ello solo significa que su sentido real es contrario al adoptado arbitrariamente, es decir que al resolver el sistema conocemos, además de los valores, el sentido de cada corriente.

En este caso (compruébalo) la solución del sistema conduce a que:

$$I_3 = \frac{\varepsilon_2}{R_3}$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = I_1 (R_1 + R_2)$$

$$I_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I_3 - I_1$$

Comprueba tus conocimientos

- 6.** Una fuente, con una *fem* de 24 V, produce una corriente de 10 A con una tensión en los bornes de 22 V. Halla la resistencia interna y la corriente de cortocircuito.
- 7.** Un circuito está constituido por una batería de linterna y un reóstato. Para un valor de la resistencia del reóstato de $1,65 \, \Omega$, la tensión en él es de 3,30 V, y para una resistencia de $3,50 \, \Omega$, la tensión es 3,50 V. Calcula el valor de la *fem* de la batería y su resistencia interna.
- 8.** Una batería con una *fem* de 22,5 V y una resistencia interna de $0,5 \, \Omega$ está conectada en paralelo con dos conductores de $5,0 \, \Omega$ y $20 \, \Omega$ respectivamente, formando un circuito cerrado. ¿Qué intensidad de corriente circula por los conductores?
- 9.** Diez elementos, con una *fem* de 2,1 V y una resistencia interna de $0,5 \, \Omega$ cada uno, están unidos en paralelo formando una batería. El circuito consta además de tres conductores unidos en paralelo con resistencias de $2,0 \, \Omega$; $6,0 \, \Omega$ y $12 \, \Omega$ respectivamente. Determina la intensidad de la corriente en cada conductor. Si los elementos de *fem* estuvieran en serie, ¿cuáles serían los valores de la intensidad de la corriente en los conductores?

10. Una fuente, con una *fem* de 27 V y una resistencia interna de $10\ \Omega$, alimenta con una corriente de 10 mA una bobina de alambre de cobre de 130 g. Determina la longitud y el diámetro del alambre de la bobina.
11. Determina el valor de las intensidades de las corrientes I_3 , I_2 , así como el valor de la resistencia R_x en el circuito representado en la figura 4.20, si $I_1 = 5,0\text{ A}$.

Datos:

$$R_1 = 1,0\ \Omega \quad R_2 = 2,0\ \Omega \quad R_3 = 3,0\ \Omega$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 27,5\text{ V y } r = 0,5\ \Omega$$

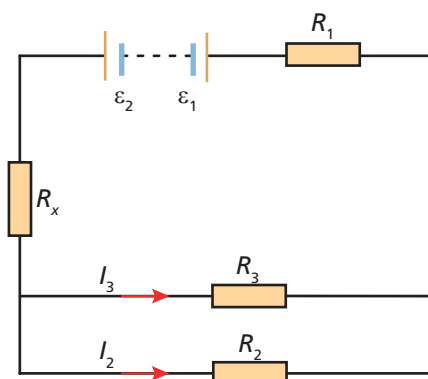


Fig. 4.20

12. Calcula la intensidad de la corriente y la caída de tensión en los resistores del circuito de la figura 4.21.

Datos:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 72\text{ V};$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = 4,0\ \Omega;$$

$$R_1 = 5,0\ \Omega;$$

$$R_2 = R_3 = 6,0\ \Omega;$$

$$R_4 = 20\ \Omega;$$

$$R_5 = 10\ \Omega.$$

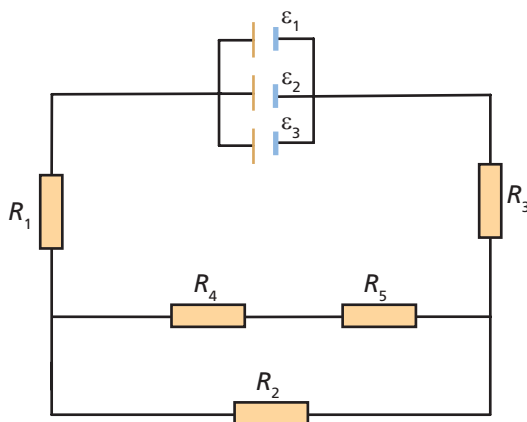


Fig. 4.21

4.3 Corriente eléctrica en diferentes medios

Además de las características del proceso de conducción en los metales, con las cuales ya estamos familiarizados, resulta también muy importante

conocer este proceso en otros medios, en particular en los líquidos, sólidos y en los llamados semiconductores y superconductores.

Conducción en líquidos y gases

Como es conocido, los gases y los líquidos, bajo ciertas condiciones, pueden ser también buenos conductores de la corriente eléctrica.

En muchos casos, la conducción en estos medios se debe a la presencia de iones. En el caso de los líquidos, un caso importante es el del agua, que resulta ser un buen conductor de la electricidad cuando, por ejemplo, en ella se disuelve sal común. Esto es consecuencia de la descomposición de las moléculas de NaCl, en iones de Cl^- y Na^+ .

En el caso de los gases, además de los iones también pueden participar los electrones. Las formas de ionización de un gas son muy variadas, por ejemplo, en la figura 4.22 se representa un dispositivo conformado por dos placas metálicas y un generador que establece entre ellas una diferencia de potencial del orden de los 10^3 V.

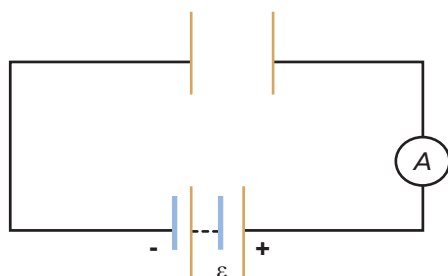


Fig. 4.22

Si se coloca entre las placas un mechero encendido el amperímetro indica el paso de corriente por el circuito. Esto sucede como consecuencia del calentamiento del gas, pues al aumentar la energía cinética de los átomos, estos pueden perder parte de su envoltura electrónica y quedar cargados positivamente. Por ejemplo, la energía mínima necesaria para ionizar el nitrógeno es de 1 402,3 kJ/mol.

Como ya se mencionó, la ionización de los átomos también puede ser lograda por muchos otros procedimientos, por ejemplo, mediante la incidencia de rayos X sobre el gas en cuestión.

Los electrones que se separan de los átomos neutros, por la acción de la ionización, pueden unirse a otros átomos neutros formando un ion negativo de manera que, en general, la conducción en el gas se efectúa por los

Las tensiones eléctricas entre las nubes y entre estas y el suelo dan lugar a las descargas eléctricas atmosféricas del orden de los $1,0 \cdot 10^8$ V y $1,0 \cdot 10^9$ V; el rayo puede conducir hasta 500 000 A

En los llamados materiales semiconductores, la conductividad puede ser intrínseca o extintica En este último caso la presencia de los portadores se a determinadas tipos de impurezas que se agregan al material con esta finalidad.

Dada la importancia que también tiene este tipo de material examinaremos detalladamente cómo se produce la conducción en ellos.

No existe un campo de la ciencia o la técnica modernas (las radiocomunicaciones, la electrónica, la televisión, la computación, las comunicaciones espaciales y otros muchos), que no haya amplia utilización de los materiales semiconductores, y mucho más específicamente de los dispositivos y equipos semiconductores.

Estos materiales no son tan buenos conductores de la corriente eléctrica como los metales, ni tan malos como los dieléctricos. Sus conductividades se encuentran entre las de los metales (del orden de $10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) y la de los aisladores ($10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a $10^{-11} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) y depende mucho de los agentes externos, por ejemplo la temperatura, las impurezas y las radiaciones.

Algunos materiales semiconductores son el germanio, el silicio, el arseniuro de galio, el sulfuro de cadmio y otros.

Examinemos ahora una de las propiedades más importante de estos materiales:

¿Cómo depende la resistencia eléctrica de los semiconductores de los agentes externos?

Tomemos una muestra de un material semiconductor, por ejemplo, germanio a la temperatura ambiente, cuidando que no esté sometido a la

acción de la luz o a una elevada temperatura, conectémosla a un circuito eléctrico, tal como se muestra en la figura 4.23. En estas condiciones se aprecia una pequeña corriente en el circuito.

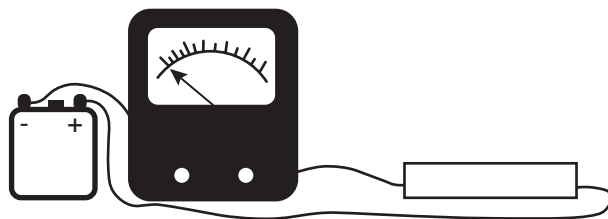


Fig. 4.23 Circuito formado por una muestra de Ge, una batería y un galvanómetro

Si la muestra semiconductor se somete a la acción de una fuente térmica, por ejemplo pongamos un mechero, se observa que la aguja del galvanómetro indica una corriente eléctrica de mayor intensidad (figura 4.24), indicando la presencia de una corriente eléctrica mayor en el circuito. Si se retira la fuente de calor, se observa que la aguja del galvanómetro regresa a su posición inicial.

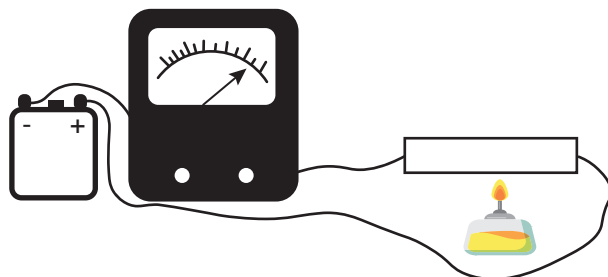


Fig. 4.24 Al calentar la muestra de Ge el galvanómetro indica un notable aumento de la intensidad de la corriente

Los experimentos anteriores evidencian la dependencia inversa de la resistencia eléctrica de los materiales semiconductores con la temperatura. Esta característica los diferencia de los metales, en los cuales la resistencia eléctrica aumenta con el aumento de la temperatura. En la figura 4.25 se muestra las curvas experimentales de dependencia de la resistencia eléctrica de un semiconductor y un metal con la temperatura.

Otros agentes externos, por ejemplo, la luz o los rayos X, también afectan sensiblemente la resistencia de los semiconductores.

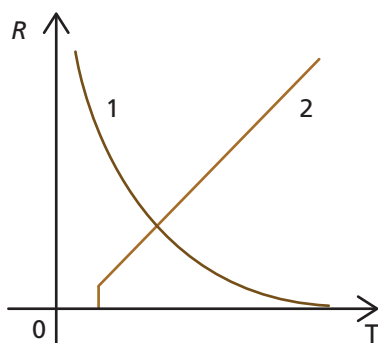


Fig. 4.25 Dependencia de la resistencia eléctrica con la temperatura de un metal (2) y de un semiconductor (1)

Este comportamiento es característico en la generalidad de los semiconductores. En el silicio, por ejemplo, la conductividad puede variar hasta 10 000 veces.

¿Por qué semiconductores son tan sensibles a la acción de los agentes externos?

Para dar respuesta a esta pregunta es necesario recurrir a la estructura microscópica de estos materiales.

Como conoces, un átomo de germanio tiene 32 electrones (ver tabla periódica) de los cuales los 28 primeros están distribuidos en capas completas y, por consiguiente, no interactúan con el resto de los átomos. Sin embargo, los cuatro restantes, llamados electrones de valencia, sí lo hacen. Cada uno de estos cuatro electrones es compartido con otro átomo semejante formando un enlace covalente, por lo que cada átomo de germanio está rodeado por cuatro átomos vecinos (figura 4.26).

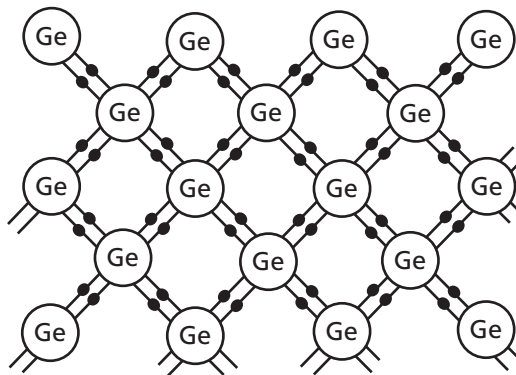


Fig. 4.26 Cada átomo de Ge comparte sus cuatro electrones de valencia con sus vecinos más próximos, formando un enlace covalente

Como se puede apreciar, los átomos se distribuyen regularmente. A esta estructura se le denomina monocristal. Los electrones de valencia están débilmente ligados a sus núcleos, y al aumentar la temperatura, llega un momento en que las vibraciones que afectan al cristal le transmiten estos electrones una energía tal, que se desprenden de sus estados originales y pasan a ser electrones libres del cristal (figura 4.27). Estos, bajo la acción de un campo eléctrico externo, pueden desplazarse por el cristal dando motivo a una corriente eléctrica de conducción. A estos electrones se les denomina **electrones de conducción**.

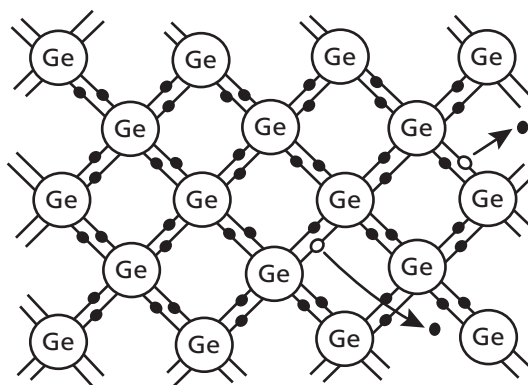


Fig. 4.27 Al aumentar la temperatura, por ejemplo, los electrones de valencia pueden pasar a ser electrones libres dentro la estructura monocristalina

La existencia de un número n de electrones de conducción en el cristal, es una de las razones por la cual la conductividad de los semiconductores, en general, aumenta con la temperatura. Cuando a un semiconductor se le aplica un campo eléctrico externo, este no solo actúa sobre los electrones de conducción, sino que también lo hace sobre los electrones de valencia.

En el primer caso el resultado es conocido. Los electrones de conducción, bajo la acción del campo eléctrico, se mueven por el cristal produciendo una corriente eléctrica. En el segundo caso no es tan sencillo. Los electrones de valencia se encuentran ligados a sus núcleos formando enlaces covalentes. Sin embargo, cada electrón de conducción que se libera del enlace deja vacío el lugar en el cual se encontraba y, por tanto, una carga positiva descompensada. Es decir, el espacio vacío tiene asociado una carga positiva de igual valor que la del electrón. Al espacio vacío se le denomina **hueco**.

El hueco puede ser ocupado por un electrón de valencia bajo la acción del campo eléctrico (figura 4.28).

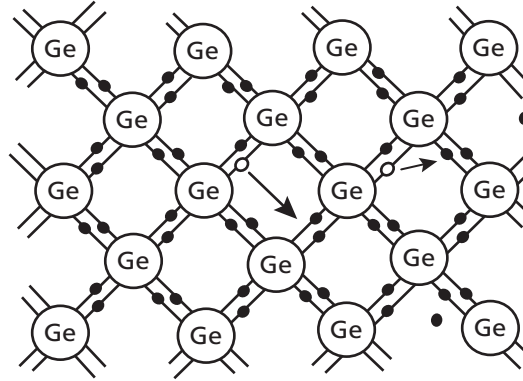


Fig. 4.28 Los electrones de valencia pueden moverse para ocupar los “huecos” dejados por los que pasaron a ser electrones de conducción

De esta forma, si el sentido del campo eléctrico es hacia la derecha, el espacio vacío se desplazará en ese mismo sentido (figura 4.29).

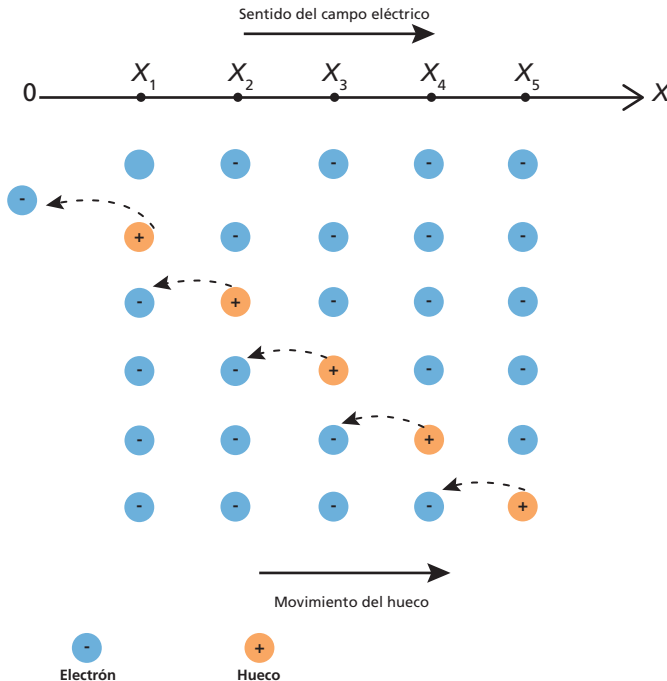


Fig. 4.29 El movimiento de los electrones en sentido contrario al campo eléctrico externo es equivalente al movimiento de los huecos en el sentido del campo

Exteriormente, este proceso se considera como el desplazamiento de una carga eléctrica positiva, que condiciona la existencia de una corriente eléctrica debido al movimiento de los huecos.

El análisis anterior permite considerar que en el interior del semiconductor hay dos tipos de partículas cargadas: los electrones de conducción negativos y los huecos positivos. Es por ello que los semiconductores presentan dos tipos de conductividad: la conductividad electrónica y la conductividad por los huecos.

En un cristal semiconductor ideal la corriente eléctrica se crea por el movimiento de idénticas cantidades de electrones cargados negativamente y de huecos cargados positivamente. A este tipo de conducción se le denomina **conducción intrínseca del semiconductor**.



Saber más

¿Cómo analizar este proceso desde el punto de vista energético?

En un monocristal de germanio a temperatura ambiente y preservada de la luz, los electrones de valencia se encuentran en un conjunto de estados energéticos llamado banda de valencia.

Al adquirir determinada cantidad de energía, estos electrones pasan a ser libres, moviéndose en otro conjunto de estados denominado banda de conducción (figura 4.30).



Fig. 4.30

Entre estas dos bandas se encuentra un intervalo de energía cuyos valores no pueden poseer los electrones. O poseen energía suficiente para convertirse en electrones de conducción o permanecen como electrones de valencia. Esta banda se denomina banda prohibida.

En la banda superior (figura 4.28) los electrones de conducción se desplazan en el cristal con valores de energía iguales o superiores a E_c , mientras que los huecos se desplazan con energías E_v , o inferiores a esta.

A partir del establecimiento de las bandas energéticas, podemos explicar los resultados de los experimentos realizados.

Cuando un monocristal de germanio se expone a la acción de una fuente de calor, la energía térmica absorbida por el cristal hace que algunos de los electrones salten desde la zona de los enlaces covalentes, es decir desde la banda de valencia, a la banda de conducción. De esa forma se producen los huecos en la banda de valencia, por lo que se incrementa el número de partículas cargadas, aumentando considerablemente la conductividad del semiconductor. Para que esto ocurra resulta necesario que el valor de la energía térmica entregada al cristal sea igual o mayor que la energía correspondiente a la banda prohibida.

Si durante la realización del experimento de la figura 4.23 utilizamos distintas muestras de germanio, observaremos que, para una misma temperatura y en completa oscuridad los valores medidos de conductividad varían entre sí. ¿A qué se debe esta diferencia? ¿Acaso no hemos tomado siempre muestras de Ge? La respuesta a estas interrogantes la encontramos en la composición interna del germanio. Toda sustancia tiene una determinada cantidad de impurezas que son capaces de influir grandemente en el comportamiento de sus propiedades, aunque solo constituyan una pequeña parte del material.

Supongamos que un cristal de germanio tiene una cantidad de átomos de arsénico (As) distribuidos en su interior. Conoces que el átomo de este elemento tiene 33 electrones de los cuales 5 son de valencia, o sea, tiene uno más que el de germanio.

Cuando un átomo de arsénico se encuentra en la red del germanio, solo tendrá cuatro átomos vecinos próximos con los cuales compartir sus cinco electrones de valencia, por lo que un electrón el quinto, estará más débilmente ligado al átomo que los restantes electrones de valencia, que formarán parte de los cuatro enlaces covalentes. Esto significa que se necesita una menor cantidad de energía para arrancar este electrón del átomo y hacer que forme parte de los electrones de conducción, con plena libertad de movimiento por todo el cristal (figura 4.31).

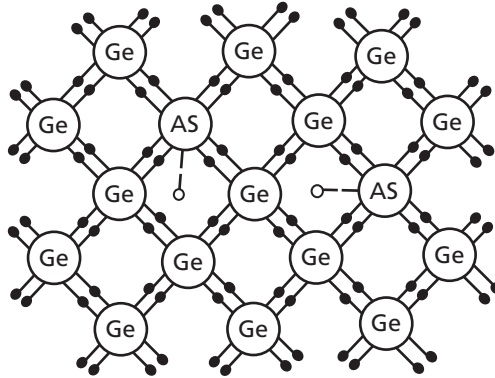


Fig. 4.31 El quinto electrón del átomo de arsénico estará débilmente ligado a los átomos de germanio

Este electrón deja tras sí una carga positiva, no compensada, del núcleo de As. Como los cuatro enlaces en torno a este núcleo están ocupados, no hay movimiento de los electrones de valencia bajo la acción de un campo eléctrico externo y, por consiguiente, en este caso no habrá formación de un hueco, como ocurre en los semiconductores puros.

Desde el punto de vista energético este quinto electrón tendrá una energía E_d inferior, pero muy cercana a la energía E_c , de los electrones de conducción, por lo que los estados energéticos de estos "quintos" electrones se pueden representar, en el diagrama de bandas, como se muestra en la figura 4.32.

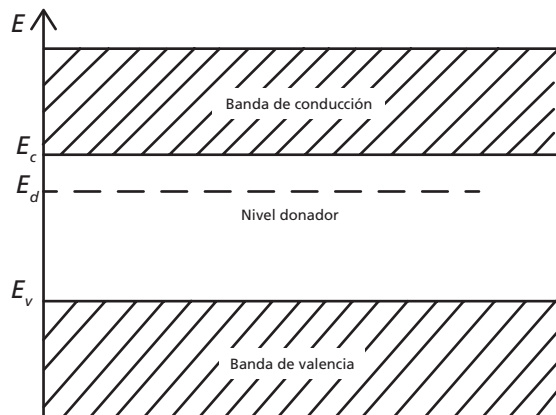


Fig. 4.32 Representación en el diagrama de bandas del efecto energético de la presencia de las impurezas donadoras

Al nivel energético de esos electrones se le llama nivel donador, pues la impureza cede electrones. Por eso, el As y a otros elementos químicos del grupo V de la tabla periódica se les denomina impurezas donadoras.

En un semiconductor con impurezas donadoras los electrones son los portadores principales de la corriente, aunque no los únicos, ya que existe un determinado número de huecos.

A los materiales semiconductores con impurezas donadoras, en los cuales los electrones son los portadores principales de la corriente eléctrica, se les denomina semiconductores del tipo n .

¿Existirán solamente impurezas donadoras?

Veamos qué sucede si a un cristal de germanio se le añaden átomos de Boro (B). Conoces que este elemento tiene cinco electrones, de los cuales tres son de valencia. Por tal razón, al ser introducido un átomo de boro en la red del germanio, le falta un electrón para formar los enlaces con los cuatro electrones de valencia vecinos (figura 4.33). Entonces, con una cantidad mínima de energía, un electrón de valencia de otro enlace puede pasar a ocupar el espacio vacío que queda en el enlace entre el boro y uno de los átomos de germanio que le rodea.

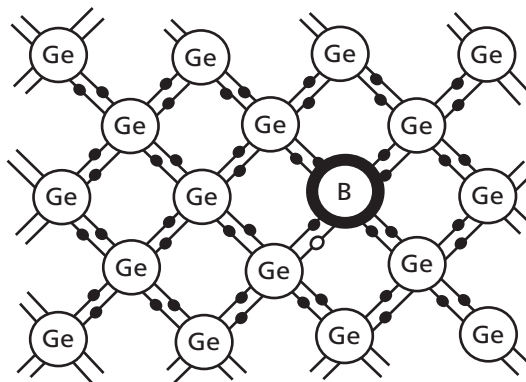


Fig. 4.33

Los estados energéticos que ocuparán estos electrones de valencia atrapados, estarán situados en el diagrama de bandas por encima de la banda de valencia, pero muy cerca de ella (figura 4.34).

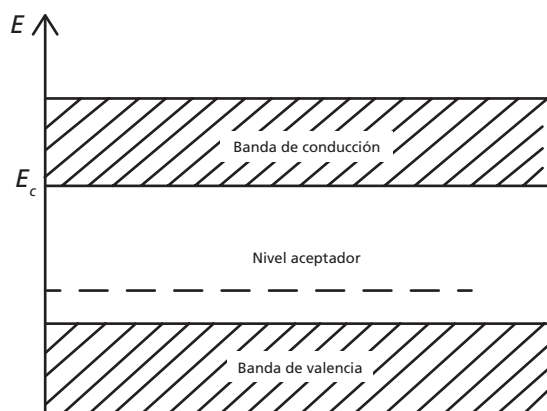


Fig. 4.34

Al nivel formado por estos estados se le llama nivel aceptador, porque realmente los átomos de Boro "aceptan" electrones e indirectamente crean huecos.

En este proceso, el átomo de boro se transforma en un ion negativo, a la vez que se produce un hueco en la zona del enlace desde donde se produjo el salto. Además de estos huecos aportados por los átomos de las impurezas existe cierta cantidad de portadores minoritarios, debido a las características intrínsecas del semiconductor.

Las impurezas que toman electrones y originan idénticas cantidades de huecos móviles, sin que el número de electrones de conducción aumente, se denominan impurezas aceptadoras. Para temperaturas pequeñas, los principales portadores de la corriente en los semiconductores con impurezas aceptadoras son los huecos (portadores mayoritarios), y los electrones son los portadores secundarios (portadores minoritarios).

Los semiconductores en los cuales la concentración de los huecos supera a la concentración de los electrones de conducción son denominados semiconductores del tipo p.

Tanto en los semiconductores donde predominan las impurezas donadoras (tipo n), como en los que predominan las impurezas aceptadoras (tipo p), la conducción se efectúa por los portadores originados por las impurezas. Por esta razón, a este tipo de conducción se le denomina **conducción extrínseca**, a diferencia de la intrínseca, donde los portadores son generados por el propio material semiconductor.

Unión p-n. Diodo semiconductor

La Unión p-n es la base del principio de funcionamiento de la mayoría de los dispositivos semiconductores.

¿Qué es una unión p-n?

Una unión o juntura p-n representa la unión o contacto de dos semiconductores con distintos tipos de conductividad eléctrica; esto es, la unión de un semiconductor con impurezas donadoras (tipo n) con un semiconductor con impurezas aceptadoras (tipo p).

Para formar una juntura p-n en un cristal que posee una conductividad electrónica, por ejemplo, es necesario crear una región con conductividad originada por huecos, o viceversa. La constitución de esta región se logra introduciendo impurezas en el proceso de crecimiento de un cristal, o introduciendo átomos de impurezas en un cristal ya preparado.

Veamos qué sucede en la frontera que separa las regiones del cristal con distintos tipos de conductividad. Para ello, utilicemos un modelo formado por dos semiconductores uno p y otro n que se unen íntimamente.

Como el semiconductor n posee una cantidad grande de electrones de conducción, y el p posee una cantidad grande de huecos, los electrones de conducción se difunden hacia el semiconductor p recombinándose con los huecos (figura 4.35), ocasionando la aparición de cargas no compensadas (iones negativos) en la frontera del semiconductor p (figura 4.36).

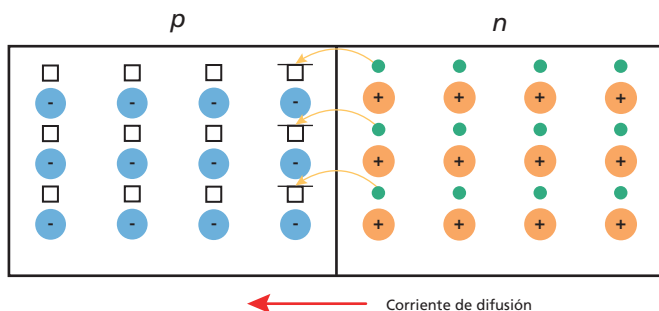


Fig. 4.35 Los electrones del semiconductor n se difunden hacia el p. Esto equivale a que queden huecos en n o, lo que es lo mismo, que los huecos del semiconductor p se difundan hacia el n

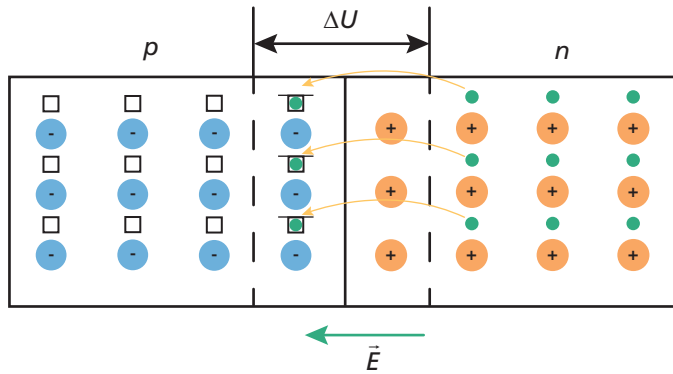


Fig. 4.36 La difusión de los electrones del semiconductor n al p tiene dos efectos: la recombinación con los huecos en p , dando lugar a la formación de iones negativos y la formación de iones positivos en n debido a su migración (o lo que es lo mismo debido a la difusión de los huecos de p hacia n)

Por otra parte, la difusión de electrones desde el semiconductor n al p , ocasiona la aparición de iones positivos no compensados en la capa límite del semiconductor n (lo que es equivalente a que los huecos se difunden hacia la región n).

Así en el límite de los dos semiconductores se crea una capa eléctrica que origina un campo eléctrico $\vec{E}_0$ en dirección a las cargas eléctricas negativas (figura 4.36). Este campo eléctrico se opone al paso de los electrones del semiconductor n al p frenando el proceso de difusión.

Este campo eléctrico recibe el nombre de *campo barrera* y la tensión que surge se llama *barrera de potencial*. Por ejemplo, en una unión p - n de silicio, este potencial es de 0,6 V.

¿Qué ocurre cuando una unión o juntura p - n se conecta a un circuito eléctrico?

Supongamos que a la juntura p - n se conecta una fuente como se muestra en la figura 4.37

El campo eléctrico de la fuente $\vec{E}$ es de sentido contrario al campo barrera $\vec{E}_0$ y lo reduce. Por lo tanto, los portadores de carga mayoritarios (electrones y huecos) pueden atravesar con facilidad la juntura (figura 4.38). Esto da como resultado que a partir de una tensión pequeña aproximadamente 0,6 V en el Si y 0,21 V en el Ge pueda fluir a través de la juntura una corriente relativamente intensa.

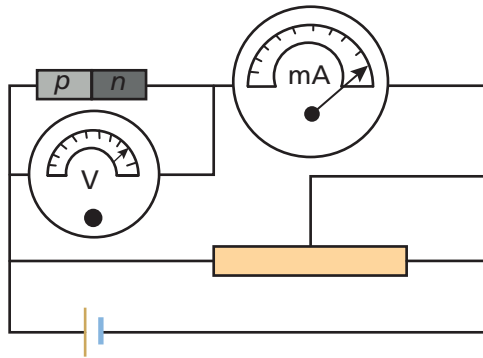


Fig. 4.37

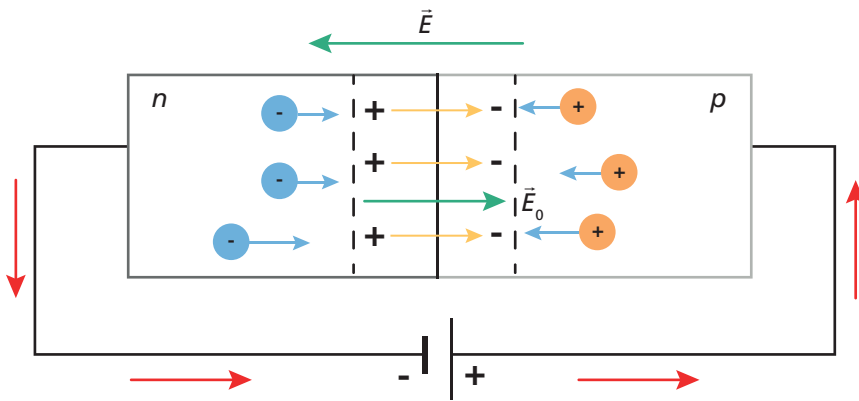


Fig. 4.38

Si se hace variar la tensión y medimos la intensidad de la corriente que circula por el circuito obtendremos una característica voltampérica similar a la que se muestra en la figura 4.39.

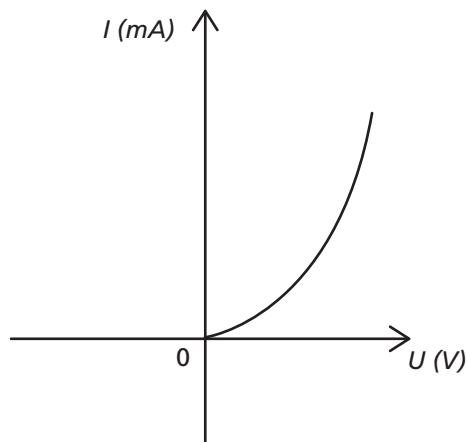


Fig. 4.39

Cuando el semiconductor se conecta como en el caso de la figura 4.37, se dice que está polarizado en directa o en sentido de paso.

Si invertimos la conexión de la batería (figura 4.40), el sentido del campo eléctrico de la fuente $\vec{E}$ es igual al del campo barrera $\vec{E}_0$. Esto hace que el campo eléctrico $\vec{E}_0$ se intensifique oponiendo una mayor resistencia al paso de los portadores mayoritarios.

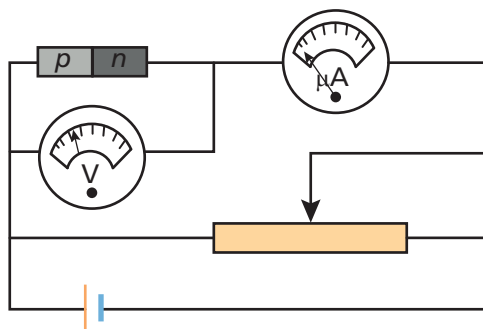


Fig. 4.40

En estas circunstancias, solo pueden pasar la barrera los portadores minoritarios que existen en ambos semiconductores. La intensidad de la corriente es muy pequeña del orden de los microamperes (figura 4.41).

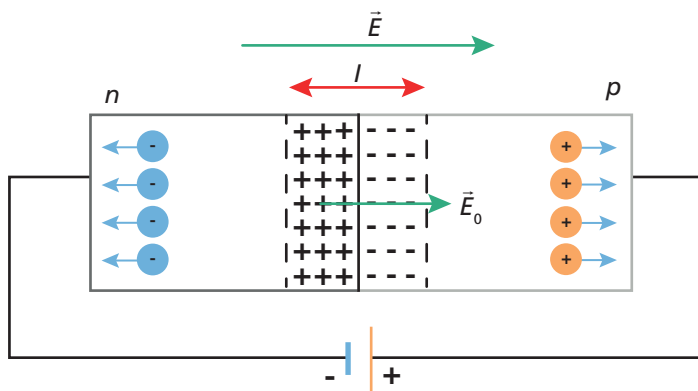


Fig. 4.41

Por esta razón la curva voltampérica de esta conexión adopta la forma que se muestra en la figura 4.42. Se dice que la juntura se encuentra, entonces, polarizada en sentido inverso.

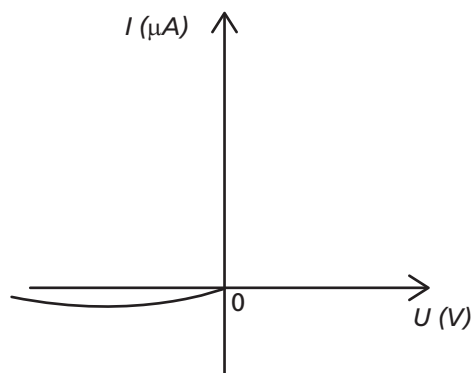


Fig. 4.42

La propiedad de la juntura p-n de conducir bien la corriente eléctrica en un sentido y mal en el otro se utiliza en dispositivos electrónicos denominados *diodos semiconductores* que se utilizan para transformar la corriente alterna en directa.

En la figura 4.43 se muestra el esquema de la estructura de un diodo semiconductor y su símbolo. La conducción se produce en el sentido indicado por la flecha en el símbolo.

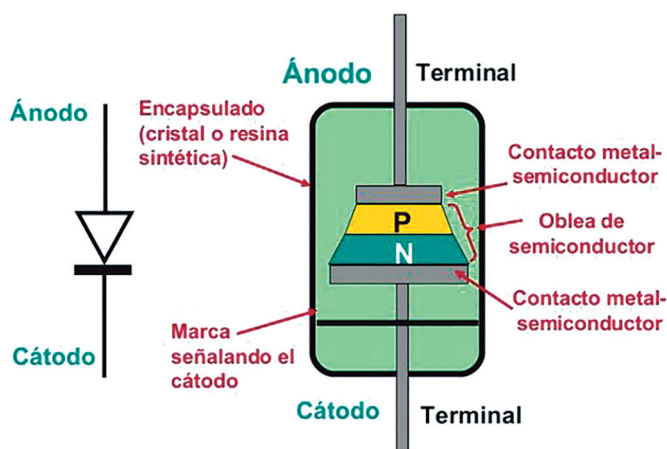


Fig. 4.43

Existe un tipo de diodo denominado emisor de luz (Led) en el cual se produce, al hacerle circular la corriente en sentido de paso, un proceso de recombinación de electrones y huecos en la zona de unión que provoca emisión de luz (figura 4.44). En la actualidad la utilización de los Led se ha

generalizado como fuentes de luz con un alto índice de eficiencia energética (figura 4.45 a y b).

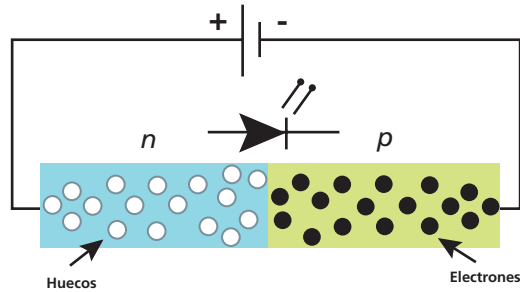


Fig. 4.44

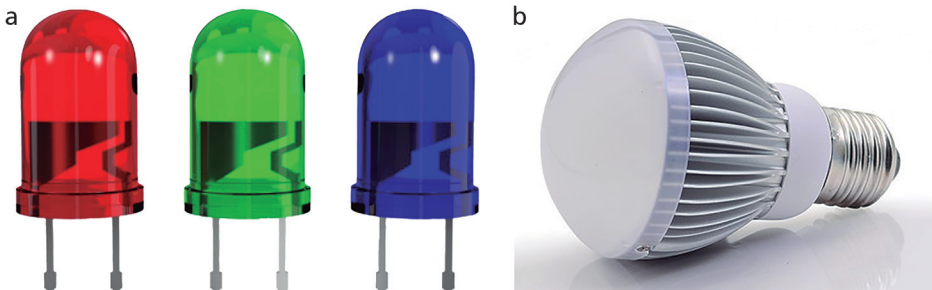


Fig. 4.45 a) Leds de color azul, rojo y verde; b) Lámpara Led de luz blanca

Superconductores

En la actualidad se trabaja por buscar materiales que conduzcan la corriente eléctrica sin resistencia, los llamados superconductores. Se conoce que, con el aumento de la temperatura, el movimiento caótico de las partículas es mayor y con ello aumenta la resistencia eléctrica, una de las formas de disminuir la resistencia eléctrica hasta hacerla cero (estado de superconductividad) es disminuyendo la temperatura. Cuando se alcanza el cero absoluto, la energía de sistema, en este caso un conductor, es mínima; en este estado el conductor debe comportarse como superconductor, pero los experimentos no confirmaron esta idea exactamente, aunque en la práctica con la disminución de la temperatura aumenta la conductividad, para algunos conductores clásicos como la plata Ag y el cobre Cu la superconductividad no se alcanza y si se logra con estructuras más complejas, la explicación exacta de estos fenómenos se busca hasta el día de hoy. En los años ochenta del siglo pasado, se descubrieron materiales que alcanzan el estado de superconductividad a temperaturas superiores a la

del nitrógeno líquido $T_c = 77\text{ K}$, lo cual permitió estudiar la superconductividad relativamente fácil, pues antes se estudiaban estos efectos con helio líquido, cerca del cero absoluto.



De la historia

En 1983 Karl Alexander Müller y Johannes Goerg Bednorz descubren la superconductividad en una cerámica del tipo $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, a temperatura de 97 K, lo que abrió una nueva etapa en estas investigaciones. En el año 1988 otro material compuesto fundamentalmente por bismuto fue descubierto y su temperatura crítica es de 110 K y hoy día el record lo tiene otro material con la temperatura crítica de 138 K, unos -138 °C .

Comprueba tus conocimientos

13. ¿Cuáles portadores de carga están presentes en un semiconductor puro?
14. ¿Qué ocurre al encuentro de un electrón con un hueco?
15. ¿Por qué en la fabricación de elementos semiconductores es necesario emplear sustancias casi químicamente puras?
16. ¿Por qué la resistencia de un semiconductor depende mucho de la presencia en él de impurezas?
17. ¿Qué impureza, donadora o aceptora, hay que introducir para obtener un semiconductor de tipo n?
18. ¿Qué portadores de carga son mayoritarios y cuales minoritarios en semiconductor con impurezas aceptora?

4.4 Campo magnético

El conjunto de fenómenos que actualmente conocemos con el nombre de magnéticos, en sus formas más simples, datan desde tiempos muy remotos y por ello resulta difícil precisar la época de su descubrimiento. Las fuentes más aceptables estiman que esto ocurrió hace aproximadamente 2 000 años, en una región al noreste de Grecia llamada Magnesia, donde fueron encontradas ciertas piedras (magnetitas), después llamadas imanes, que tenían la propiedad de atraer tozos de hierro. Por su gran impacto sociocultural, debe destacarse que en el siglo XII los chinos, sobre la base de las propiedades de los imanes, inventaron la brújula.

En el siglo ^{xvii} el médico inglés William Gilbert fabricó imanes artificiales frotando trozos de hierro con magnetita y realizó importantes contribuciones al estudio de los fenómenos magnéticos.



De la historia

Hans Christian Oersted (figura 4.46), celebre físico danés, profesor en la universidad de Copenhague. El 15 de febrero de 1820 durante una conferencia que dictaba, relacionada con el efecto térmico de la corriente eléctrica, descubrió la relación, hasta entonces desconocida, entre los fenómenos eléctricos y magnéticos.



Fig. 4.46

Los temas de la electricidad y el magnetismo se desarrollaron en forma independiente hasta 1820, en que el profesor danés Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración de clases, que una corriente eléctrica afecta la orientación de la aguja de una brújula. Esta idea fue generalizada después por el físico francés André-Marie Ampere, que propuso que la fuente de todos los fenómenos magnéticos era la corriente eléctrica.



Recuerda que

De estudios anteriores conocemos algunos fenómenos relacionados con el comportamiento de los imanes permanentes y los electroimanes, en particular, la atracción que pueden ejercer sobre otros cuerpos en dependencia de su naturaleza. Compruébalo aproximando un imán a los cuerpos de diferentes materiales

Los cuerpos de hierro, níquel, cobalto o de algunos de sus compuestos y aleaciones forman parte de los que interaccionan con los imanes. Al material de que están hechos estos cuerpos se le llama *ferromagnético*.

Los imanes, ya sean naturales o artificiales, cuentan con dos polos magnéticos, uno llamado Norte y otro Sur (figura 4.47). En los polos magnéticos la acción magnética es más intensa.



Fig. 4.47 Representación de un imán tipo herradura.

Nota como en los polos es mayor la atracción magnética ejercida por el imán sobre las limaduras de hierro

Al acercar un imán a un grupo de presillas que están a determinada distancia (figura 4.48), estas son atraídas por el imán. En la medida que el imán se acerca a las presillas la fuerza de atracción sobre ellas aumenta y aunque esta fuerza parece actuar de inmediato sobre las presillas, se requiere de determinado tiempo para ello.

La acción magnética se transmite de manera similar a la acción eléctrica, a través del llamado *campo magnético*, a una velocidad de 300 000 km/s.



Fig. 4.48 El campo magnético del imán transmite la acción del imán a las presillas, las que se pegan al imán

El campo magnético es un sistema físico que, entre otras, tiene la propiedad de transmitir las interacciones magnéticas.

De cierta manera, la configuración del campo magnético puede ser apreciada cuando esparcimos limaduras de hierro sobre un imán. La disposición que adoptan las limaduras de hierro nos proporciona información sobre algunas características del campo magnético en cuestión, cuestión que detallaremos más adelante. Esta disposición o distribución se conoce como espectro del campo magnético y las líneas a lo largo de las cuales se orientan las limaduras como líneas del campo magnético o *líneas de inducción magnética* (figura 4.49). Sobre las líneas de inducción magnética volveremos más adelante.

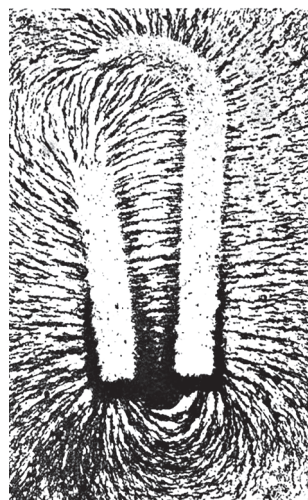


Fig. 4.49 Espectro del campo magnético de un imán en forma de herradura

El campo magnético se mide en una unidad denominada tesla (T), en honor de Nikola Tesla (1856-1943), ingeniero de origen croata, a quien se deben múltiples invenciones e innovaciones relacionadas con la generación y transmisión de la electricidad.

Recuerda también que cuando dos cuerpos magnetizados (imanes) interactúan, se pueden atraer (polos distintos) o repeler (polos iguales).

Sugerencia: comprueba esto de manera práctica.

Nuestro planeta y otros muchos astros constituyen ejemplos de imanes naturales gigantes. En la superficie de la Tierra el valor de la intensidad del campo magnético es aproximadamente 10^{-4} T.



Saber más

El magnetismo terrestre

Cuando Cristóbal Colón cruzó el Atlántico en 1492 en busca de las indias, notó que la aguja de la brújula se desviaba ligeramente de la dirección norte indicada por las estrellas y que la desviación cambiaba a medida que se alejaba del continente. Sin embargo, no fue hasta alrededor de 100 años después que William Gilbert logró explicar la desviación, al considerar un modelo en el que la Tierra se comportaba como un imán gigantesco (figura 4.50), con sus polos magnéticos situados a cierta distancia de los polos geográficos (los polos geográficos son los puntos de la superficie terrestre por donde pasa su eje de rotación). De ahí que la brújula apunte siempre directamente al polo magnético, y no al polo geográfico. La diferencia entre la lectura de la brújula y el norte verdadero se llama

declinación magnética. Los polos magnéticos se encuentran a una considerable distancia de los polos geográficos; el polo sur magnético se encuentra cerca de la isla de Bathurst, en el norte de Canadá, a unos 1 600 km del polo norte; el polo norte magnético se encuentra cerca de la Tierra Adelia de la Antártica, a unos 2 600 km del polo sur.

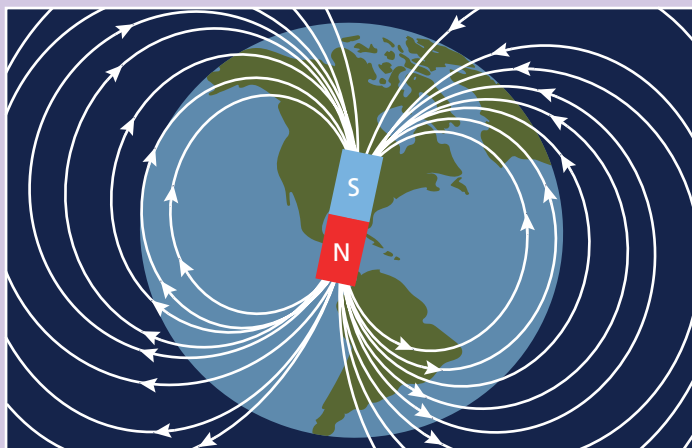


Fig. 4.50 Representación esquemática del campo magnético de la Tierra

La aguja magnética se orienta a lo largo de las líneas de inducción del campo magnético de la Tierra, señalando su polo norte hacia el polo sur magnético de la Tierra, que se encuentra a más de 1 000 km de su polo norte geográfico.

Como los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con sus polos geográficos, la dirección de la aguja magnética tampoco coincide de los meridianos geográficos. El ángulo entre el meridiano geográfico de una localidad dada y la dirección de la aguja magnética se llama *ángulo de declinación*.

El conocimiento de la declinación magnética en cada lugar de la Tierra es esencial para la navegación, pues a partir de ella se puede determinar el meridiano geográfico y el polo norte geográfico, y conocer la orientación de la aguja magnética de la brújula.

La naturaleza del campo magnético de la Tierra no está del todo establecida. Se cree que el campo magnético de la Tierra es consecuencia del comportamiento de las partículas radiactivas en el núcleo de la Tierra, junto con las fuerzas provocadas por su rotación. Los científicos creen que las corrientes de convección de metal fundido cargado que circulan en

el núcleo de la Tierra son las fuentes de este campo magnético. El campo magnético protege la Tierra, desviando las partículas con alta energía procedentes del Sol: sin él la vida en la Tierra sería imposible. El campo magnético se debilita e invierte cada varios siglos, como parte de un ciclo natural. Cuando se producen las inversiones de los polos magnéticos puede haber períodos en los que está ausente, provocando dificultades a los animales que lo utilizan para orientarse. Se ha encontrado que la posición de los polos magnéticos cambia considerablemente con el tiempo, fenómeno conocido como *deriva polar*. Se ha dado incluso el caso de que la deriva polar se invierta; es decir, que el desplazamiento de los polos cambie de sentido o retroceda.

4.5 La interacción de conductores con corriente y el campo magnético

Como ya se mencionó, fue el profesor danés Hans Christian Oersted quien en 1820 asoció la relación entre el magnetismo y la corriente eléctrica.

En la figura 4.51 se puede apreciar un esquema que representa la versión moderna del experimento de Oersted: el conductor está alineado respecto a la aguja de la brújula, que inicialmente está orientada por el campo magnético de la Tierra, y al pasar corriente por el conductor la aguja rota hasta colocarse perpendicularmente al conductor. Nota que, si se invierte el sentido de la corriente, entonces, la aguja rota en sentido contrario.

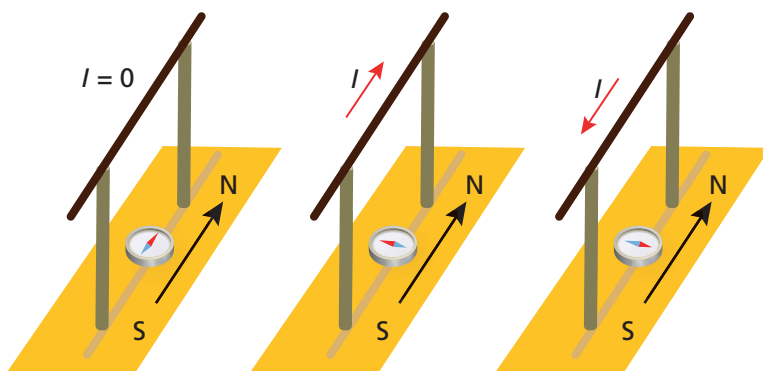


Fig. 4.51 Esquema del experimento de Oersted

Siguiendo el descubrimiento de Oersted, se supuso inmediatamente que el efecto magnético de la corriente debería inducir magnetismo en

pedazos de hierro en la misma forma en que lo hace un imán ordinario y esto se verifico rápidamente. De hecho esta es la base de los electroimanes y de otras muchas aplicaciones prácticas del magnetismo (figura 4.52).



Fig. 4.52 Las grúas que se utilizan para recoger chatarra poseen un potente electroimán (bobina, con un núcleo de hierro por la que circula corriente) que atrae pedazos de material ferromagnético, en este caso la chatarra

Una implicación directa del experimento de Oersted es la de que un alambre portador de corriente en las proximidades de un imán debe experimentar la acción de una fuerza. Esto es, naturalmente, una referencia a la tercera ley de Newton, siendo la implicación que cuando se invierten los papeles de los objetos en el experimento de Oersted, un alambre portador de corriente fácilmente movable debe presentar la acción de una fuerza cuando es colocado en la vecindad de un imán rígidamente fijo (figura 4.53).

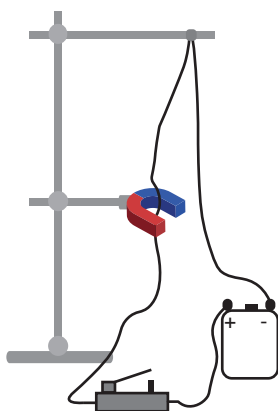


Fig. 4.53 Cuando circula corriente por un conductor en las proximidades de un imán fijo, sobre el conductor actúa una fuerza de naturaleza magnética

Oersted, Faraday y otros verificaron rápidamente esta predicción y determinaron la dirección de la fuerza en arreglos que tenían geometría simple. Como la fuerza no actúa a lo largo de la línea que une el polo magnético y el alambre, no es inmediatamente obvio cual debe ser la dirección de la fuerza sobre el alambre.

Otra consecuencia inmediata del experimento de Oersted es que se espera que dos conductores por los que circulan corrientes deben ejercer fuerzas uno sobre el otro, puesto que el efecto magnético producido por uno podría interactuar con la corriente del otro y viceversa. Esto lo estudió Ampere, quien realizó los experimentos y determinó que dos alambres paralelos por los que circulan corrientes en igual sentido se atraen (figura 4.54 c) y si tienen sentidos contrarios se repelen (figura 4.54 b).

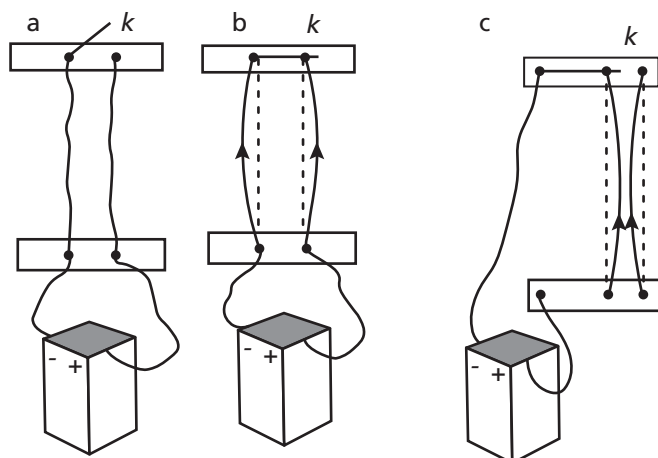


Fig. 4.54 Efecto del campo magnético asociado a conductores por los que circula corriente eléctrica

Una de las muchas preguntas debido al descubrimiento de Oersted es: ¿qué sucedería si un objeto eléctricamente cargado se mueve, en el interior de un campo magnético, a diferentes velocidades? ¿Es esto análogo a una corriente eléctrica dentro de un alambre y son semejantes los efectos magnéticos producidos? La mayoría de los físicos estaban completamente convencidos de que la respuesta sería afirmativa.

De hecho, la explicación del efecto magnético de la corriente es que a las partículas cargadas en movimiento les es inherente no solo el campo eléctrico, sino también un campo magnético. En general, a las partículas cargadas en movimiento les es inherente un campo electromagnético.

Recordemos que una forma de caracterizar el campo electrostático es mediante el “vector intensidad de campo electrostático” que fue definido como:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Que se puede escribir de la forma:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}$$

Donde $\vec{F}$ es la fuerza electrostática coulumbianas, en un punto cualquiera del campo, sobre un cuerpo cargado de prueba con carga q_0 .

¿Cómo caracterizar cuantitativamente al campo magnético?

Vector inducción magnética y líneas de inducción

Se puede demostrar y comprobar experimentalmente que si una partícula cargada con carga q , se mueve con velocidad de valor v , formando un ángulo α , con la dirección del campo magnético, sobre ella actúa una fuerza de valor $\vec{F}_{mag}$ en la dirección y sentido que se muestra en la figura 4.55, y la relación $\frac{F_{mag}}{q \cdot v \cdot \text{sen} \alpha}$, es una constante para cada punto del campo magnético.

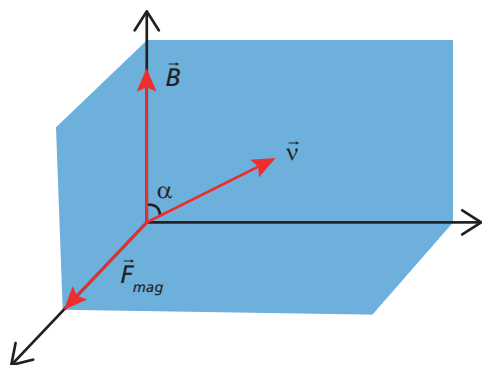


Fig. 4.55 La fuerza magnética que actúa sobre el cuerpo puntual cargado que se mueve con velocidad $\vec{v}$, en el seno de un campo magnético, es siempre perpendicular al plano que forman los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$

En consecuencia, esta relación permite caracterizar el campo magnético y se denomina “inducción magnética”. Esta magnitud se representa con la letra B .

$$B = \frac{F_{mag}}{q \cdot v \cdot \text{sen} \alpha}$$

4.10

De manera que el módulo de la fuerza este dado por:

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad 4.11$$

Que se puede escribir como:

$$F_{mag} = qvB\text{sen } \alpha \quad 4.12$$

Debemos notar que de acuerdo con esta definición:

Si la partícula cargada se mueve paralelamente a las líneas de inducción magnética ($\text{sen } \alpha = 0$) la fuerza magnética sobre ella es nula.

La fuerza magnética sobre la partícula es máxima cuando la velocidad es perpendicular a la dirección de las líneas de inducción magnética.

La fuerza magnética sobre una partícula cargada es siempre perpendicular al plano que forman el vector inducción magnética y el vector velocidad, que a su vez son perpendiculares entre sí.

Cómo la fuerza magnética ($\vec{F}_{mag}$), sobre un cuerpo cargado que se mueve en un campo magnético de inducción $\vec{B}$ con velocidad $\vec{v}$, esta dada por la ecuación $\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$, una manera de conocer la dirección y sentido de la fuerza magnética es utilizando la llamada "regla de la mano derecha". Recordémosla para este caso:

Regla de la mano derecha

Se hacen coincidir los dedos de la mano derecha en el sentido del primer vector (vector velocidad) y se rotan los dedos hacia el sentido del segundo vector (vector inducción magnética), entonces, se extiende el pulgar y ello indica la dirección del producto vectorial $\vec{v} \times \vec{B}$, es decir, de la fuerza magnética sobre el cuerpo puntual cargado (figura 4.56).

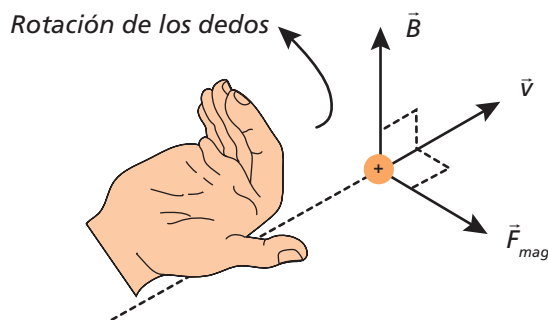


Fig. 4.56 Ilustración de la aplicación de la regla de la mano derecha

Debe tenerse en cuenta que si la carga del cuerpo es negativa, la dirección de la fuerza magnética tendrá sentido contrario al encontrado al aplicar la regla (figura 4.57).

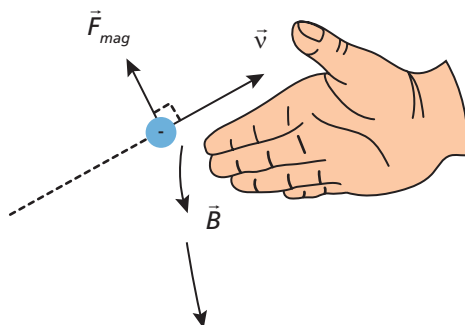


Fig. 4.57 Caso particular de la regla de la mano derecha para una partícula con carga eléctrica negativa, los dedos se orientan en sentido contrario al vector velocidad

Conocemos que la unidad de medida de la inducción magnética en el SI es el Tesla.

De acuerdo con la ecuación 4.10:

$$B = \frac{F_{mag}}{qv \sin \alpha}$$

Entonces se puede precisar que:

1,0 T es el valor de la inducción magnética que provoca una fuerza de 1,0 N sobre un cuerpo puntual, con una carga de 1,0 C, que se mueve a la velocidad de 1,0 m/s.

¿Sabías que...?

El valor de la inducción magnética, del campo magnético terrestre en el ecuador es del orden de los 34 μT y en los polos de 66 μT .

Aunque el concepto de líneas de inducción magnética nos resulta conocido de los estudios precedentes, puede ser necesario señalar que estas líneas no son líneas de fuerza, a diferencia de las que utilizamos para representar el campo electrostático, sino líneas tangentes al “vector inducción magnética” en cada punto del campo magnético. También hay que señalar otra importante diferencia con las líneas de fuerza del campo

electrostático, las líneas de inducción son cerradas. En la parte exterior del campo, “salen” del polo norte y “entran” en el polo sur (figura 4.58).

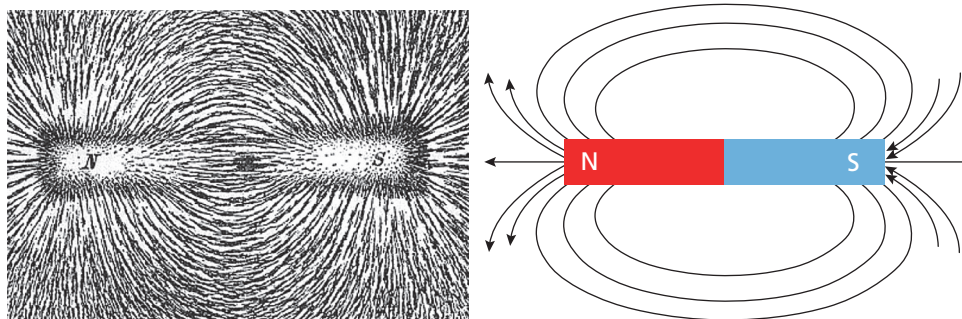


Fig. 4.58 a) espectro de un imán recto; b) esquema de algunas líneas de inducción

Esta importante característica de las líneas de inducción es el reflejo de que, a diferencia de las cargas eléctricas, los polos o cargas magnéticas no existen de manera aislada. Por ejemplo, si un imán de barra se divide en dos o más pedazos, cada uno de los pedazos tendrá un polo norte y un polo sur.

De la historia

André-Marie Ampère (1775-1836) conoce de los trabajos de Oersted por el también francés François Arago (1786-1853), quien había observado en Ginebra los experimentos de este último. Ampère se percató de que Oersted no había tomado en cuenta el efecto del magnetismo terrestre. Por lo que diseñó un experimento en el que este fuera neutralizado. Así encontró el verdadero efecto que tenía la corriente eléctrica sobre la aguja imantada: esta siempre se alinea en una dirección perpendicular a la dirección de la corriente eléctrica. Para demostrar la idea sobre la interacción de dos alambres por los cuales circula corriente diseñó un experimento como el que se muestra en la figura 4.59, en la que hay dos alambres conductores rectos unidos en sus extremos con dos pilas voltaicas. Un alambre estaba fijo y el otro suspendido para que pudiera moverse, fue así que observó que cuando hacía pasar una corriente eléctrica en ambos alambres de manera simultánea, estos se atraían cuando las corrientes tenían el mismo sentido y se repelían cuando tenían sentidos opuestos.

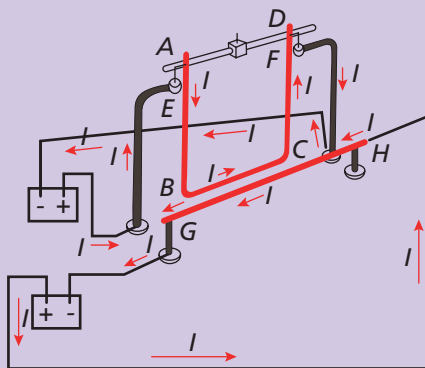


Fig. 4.59

Ampere determinó también que estas fuerzas entre los alambres que conducían corriente eléctrica se debían a efectos magnéticos: un alambre que conduce electricidad crea un efecto magnético a su alrededor (un campo), y el otro alambre, que también conduce corriente eléctrica, experimenta una fuerza. Es decir, propuso que el magnetismo que produce la corriente eléctrica en uno de los alambres genera a su vez una fuerza sobre el otro alambre que conduce electricidad.

El descubrimiento de Ampere ha tenido una repercusión práctica muy importante pues es la base del funcionamiento de los motores eléctricos.

En la misma serie de experimentos del otoño de 1820 Ampere se dio cuenta de que una aguja de imán podía detectar una corriente eléctrica, y basándose en esta idea construyó un instrumento al que llamó galvanómetro, nombre que conserva hasta el día de hoy. Esta invención de Ampere ha sido primordial ya que toda la ciencia y tecnología del electromagnetismo no se hubieran podido desarrollar sin tener un instrumento que midiera corrientes eléctricas. Antes de esta invención de Ampere, la forma en que los experimentadores decidían si había corriente era haciéndola pasar por sus cuerpos: así, mientras más fuerte fuera la sensación que tenían, concluían que mayor era la intensidad de la corriente. Es claro que de esta forma la ciencia del electromagnetismo no hubiera llegado muy lejos.

El galvanómetro inventado por Ampere se convirtió rápidamente en un instrumento vital en la investigación de fenómenos eléctricos y magnéticos. Posteriormente se mejoró pero las bases de su funcionamiento se han conservado.

Problema resuelto 4.4

En la figura 4.60 se muestran tres partículas eléctricas que se mueven con una velocidad $v = 2,0 \cdot 10^6$ m/s, al penetrar en un campo magnético uniforme sobre las partículas 1 y 2 actúa la fuerza que se indica y sobre la 3 no actúa ninguna fuerza. Determina:

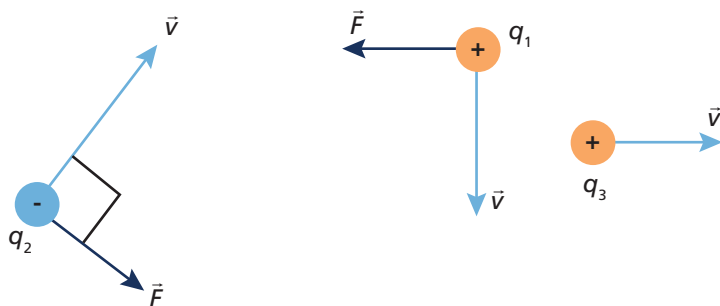


Fig. 4.60

a) La dirección de la inducción magnética que actúa sobre cada partícula.

- b) El valor de la inducción magnética en el caso de las partículas 1 y 2, si la carga de cada partícula es $q_1 = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $q_2 = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, y los módulos de las fuerzas respectivas son $F_1 = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ N}$, $F_2 = 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ N}$.
- c) De acuerdo con la regla de la mano derecha, en general con la regla del producto vectorial, el hecho de que sobre las partículas q_1 (que posee carga positiva) y q_2 (con carga negativa) actúen las fuerzas que se señalan, significa que se mueven en un campo magnético cuya dirección debe ser perpendicular al plano del papel. En el caso de la partícula q_3 (que es positiva) y sobre la cual no actúa fuerza, la dirección del campo debe ser paralelo a la velocidad de esta partícula.

Analicemos esto más en detalle. Para determinar la dirección y sentido del vector inducción magnética en los casos de las partículas q_1 y q_2 emplearemos la regla de la mano derecha, pues conocemos en ambos casos las direcciones de la velocidad y la fuerza magnética.

Al utilizar la regla de la mano derecha se deben tener en cuenta los pasos siguientes:

- Determinar con exactitud la dirección de las magnitudes que se ofrecen como dato, en forma explícita, en el esquema o figura.
- Representar la dirección de las magnitudes que se expresan en forma implícita.
- Colocar la mano derecha de manera que coincidan los componentes de esta, con la dirección de las magnitudes correspondientes que son conocidas (tener en cuenta, en el caso de la velocidad, el signo de la carga para realizar la corrección requerida en el caso de las cargas negativas).
- Determinar la dirección de la magnitud desconocida.
- Hacer los señalamientos necesarios en el esquema, considerando los símbolos que permitan identificarla.

En nuestro caso, después de tener bien caracterizadas las magnitudes conocidas: la velocidad y la fuerza magnética, coloquemos la mano derecha de manera que el dedo pulgar coincida con la dirección de $\vec{F}$ y los restantes dedos extendidos y señalando la dirección de la velocidad. Entonces, al rotar los dedos, sus extremos indican la dirección y sentido del vector inducción magnética.

En el caso de q_1 como los dedos quedan indicando hacia arriba, ello significa que el vector inducción magnética $\vec{B}$ "sale" del plano del papel,

lo cual representaremos, para no tener que hacer una representación espacial, por el símbolo:



En el caso de q_2 , se puede hacer la misma operación, pero el sentido del vector inducción magnética $\vec{B}$ será contrario al que indican los dedos pues la carga es negativa. Esto lo representaremos por el símbolo:



- d) Para calcular el valor de las magnitudes de la inducción magnética en los casos de q_1 y q_2 , se puede utilizar directamente la ecuación:

$$F_{mag} = qvB\sin\alpha$$

Despejando B y sustituyendo los valores para cada uno de los casos se tendrá que:

$$B_1 = \frac{F_{mag}}{q_1 v \sin\alpha}$$

$$B_1 = \frac{1,3 \cdot 10^{-12} \text{ N}}{(3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \left(2,0 \cdot \frac{10^6 \text{ m}}{\text{s}} \right)}$$

$$B_1 = 2,0 \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{F_{mag}}{q_2 v \sin\alpha}$$

$$B_2 = \frac{1,3 \cdot 10^{-12} \text{ N}}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \left(2,0 \cdot \frac{10^6 \text{ m}}{\text{s}} \right)}$$

$$B_2 = 9,4 \text{ T}$$

Comprueba tus conocimientos

19. ¿Qué se entiende por campo magnético? Responde esta pregunta de la manera más detallada que te sea posible.
20. ¿Cómo se define la magnitud "inducción magnética"? Considera en tu respuesta la descripción de la "regla de la mano derecha" y da algunos ejemplos de cómo aplicarla.

- 21.** ¿A qué se denomina líneas de inducción magnética? Representa, mediante líneas de inducción, el campo magnético de un imán de barra, el campo magnético de dos imanes de barra con sus polos nortes enfrentados y con los polos norte y sur enfrentados.
- 22.** Traza la dirección y sentido del vector inducción magnética en los puntos señalados con números sobre las líneas de inducción representadas en la figura 4.61:

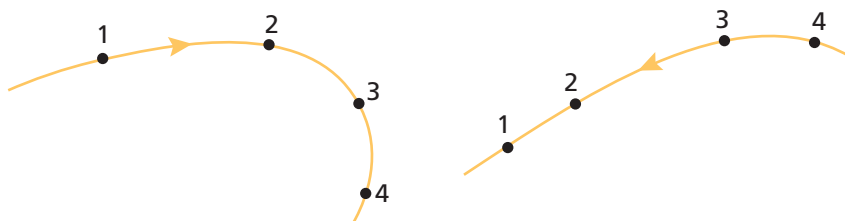


Fig. 4.61

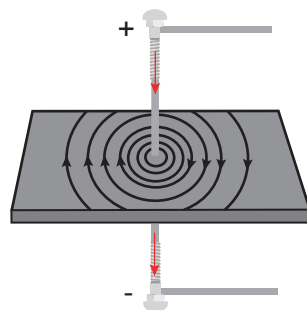
- 23.** ¿Cómo se define la unidad de inducción magnética en el SI?
- 24.** Justifica por qué los experimentos que se realizan con los montajes que se muestran en la figura 4.51 evidencian que la interacción observada en los conductores con corriente no es el resultado de la acción de los campos gravitatorio y eléctrico.
- 25.** ¿Por qué no se produce la interacción de los conductores cuando por uno de ellos circula corriente y por el otro no?

4.6 Características del campo magnético de algunas configuraciones por la que circula corriente eléctrica

Campo magnético de un conductor rectilíneo con corriente

Si se explora el entorno de un conductor rectilíneo largo en sus proximidades se puede comprobar que las líneas de inducción son circunferencias concéntricas cerradas, con su plano perpendicular al conductor (figura 4.62).

Fig. 4.62 Representación de las líneas de inducción magnética en un plano perpendicular a un conductor recto por el que circula corriente eléctrica



Esto se puede “visualizar” si se esparcen limaduras de hierro alrededor del conductor, como se muestra en la figura 4.63.



Fig. 4.63 La orientación de las limaduras de hierro en el campo magnético inherente a un conductor recto por el que circula corriente permite “visualizar” las líneas de inducción magnética

Si en lugar de limaduras de hierro se colocan pequeños imanes que puedan girar o brújulas, su orientación permite apreciar el sentido de las líneas de inducción (figura 4.64).

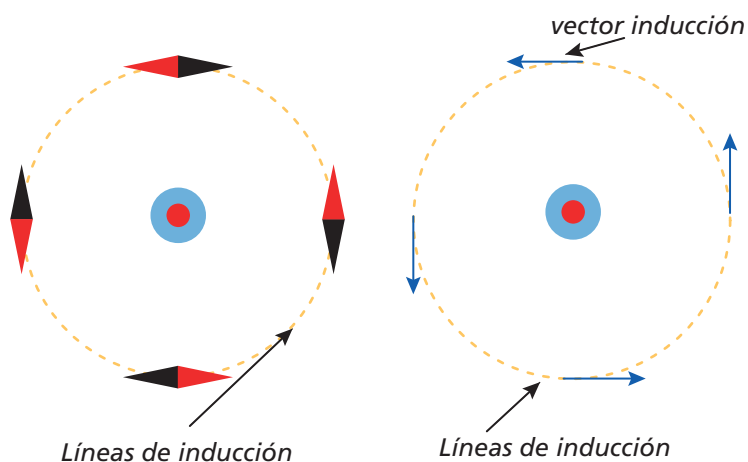


Fig. 4.64 El conductor rectilíneo (círculo azul) se ha representado perpendicular al plano del papel y el punto rojo indica que la corriente está “saliendo”, es decir dirigida hacia el observador de la figura. El caso de que la corriente esté “entrando” se acostumbra a representar mediante una cruz

En general, el sentido de las líneas de inducción para el caso de un conductor con corriente se puede determinar con una sencilla regla práctica.

Regla de la mano derecha

Se rodea el conductor con la mano derecha de manera que el dedo pulgar indique el sentido de la corriente. La punta del resto de los dedos indicará entonces el sentido de las líneas de inducción (figura 4.65).

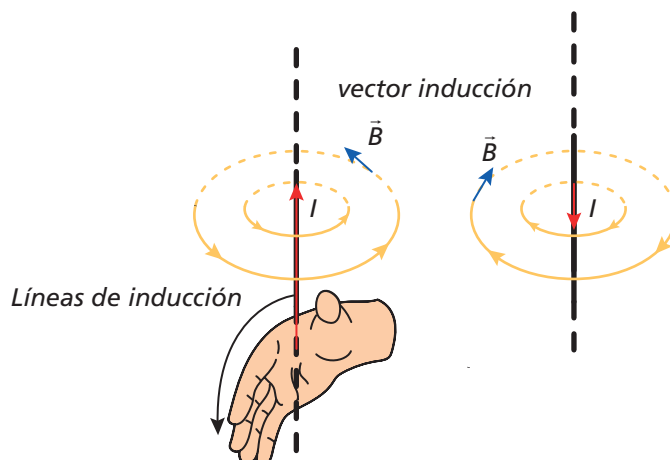


Fig. 4.65 Ilustración de la aplicación de la "regla de la mano derecha"

Para puntos próximos al conductor, en comparación con su longitud, se cumple con buena aproximación que el valor de la inducción magnética se puede calcular mediante la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad 4.13$$

Donde I es la intensidad de la corriente por el conductor, r la distancia del eje del conductor al punto y μ_0 una constante denominada **permeabilidad magnética**. En el caso del "vacío":

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \left(\text{V} \cdot \text{s/A} \right)$$

Campo magnético de una espira con corriente

Si se flexiona un conductor recto de forma que se forma un anillo o espira circunferencial y por él se hace pasar una corriente eléctrica, el campo magnético en sus proximidades es parecido al de un conductor rectilíneo, pero es muy diferente en otros puntos (figura 4.66).

En la figura 4.67 se visualizan mediante limaduras de hierro las líneas de inducción en el plano que es perpendicular al plano de la espira y que contiene al centro de esta.

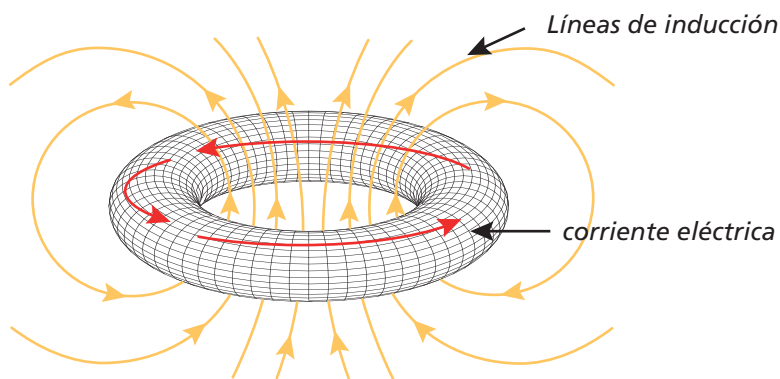


Fig. 4.66 Representación de las líneas de inducción para una espira por la que circula corriente eléctrica

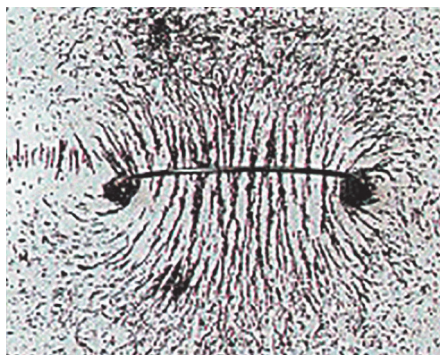


Fig. 4.67 Orientación de las limaduras de hierro en el campo magnético inherente a una espira por la que circula corriente eléctrica

El sentido de las líneas de inducción se puede determinar aplicando la regla de la mano derecha de la misma manera que en el caso del conductor rectilíneo. Compruébelo aplicándola al caso representado en la figura 4.66.

El cálculo del módulo del vector inducción magnética, en un punto cualquiera alrededor de la espira, resulta algo complejo, pero su valor en el centro de la espira se puede calcular mediante la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad 4.14$$

Donde R es el radio de la espira.

Campo magnético de un solenoide

También suele denominarse bobina. En la práctica es un alambre conductor enrollado en forma de espiral, de longitud finita, por el que

puede circular corriente eléctrica, que genera un campo magnético en su interior.

Este es un caso particularmente importante pues en su interior, en la parte alejada de sus extremos, el campo magnético es uniforme con muy buena aproximación para solenoides de longitud mucho mayor que su radio.

En la figura 4.68 se muestra la configuración del campo magnético mediante líneas de inducción para este caso y en la figura 4.69 la visualización de estas líneas de fuerza mediante limaduras de hierro esparcidas a su alrededor.

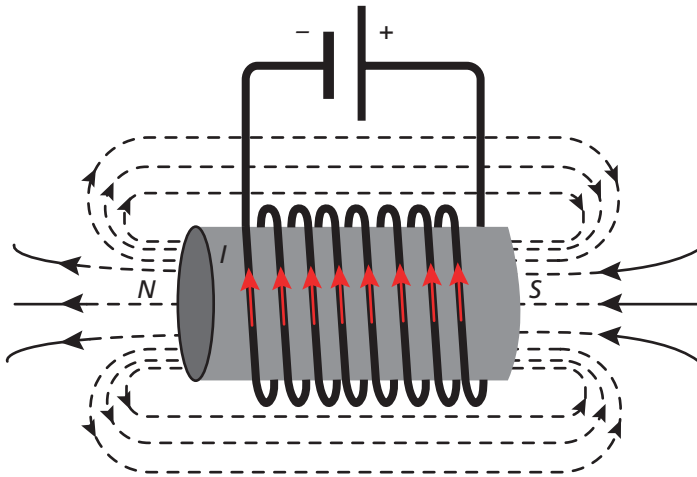


Fig. 4.68 Representación de las líneas de inducción del campo magnético de una bobina

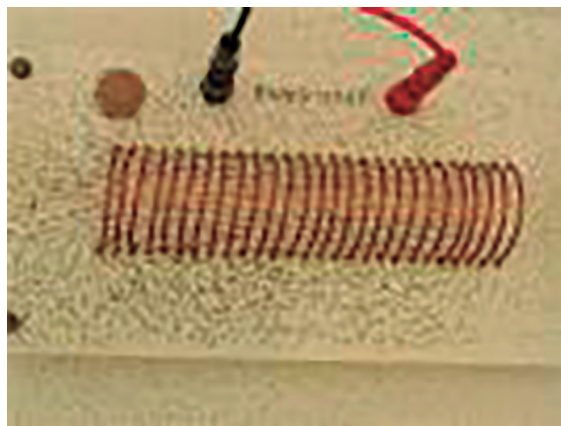


Fig. 4.69 "Visualización" mediante limaduras de hierro del campo magnético de una bobina

El sentido de las líneas de inducción se puede determinar también mediante la regla de la mano derecha: de forma imaginaria que se “abrace” con los dedos de la mano derecha una de las espiras con el pulgar indicando el sentido de la corriente, la punta del resto de los dedos indica entonces el sentido de las líneas de inducción.

En la parte interior del solenoide, donde el campo es uniforme, el valor de $\vec{B}$ se puede calcular mediante la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad 4.15$$

En esta expresión N es el número de espiras de la bobina, l su longitud y se supone que la bobina no tiene núcleo, es decir que su interior está al vacío.

Cuando se coloca un núcleo de material ferromagnético dentro de la bobina, este se magnetiza y el valor del campo se puede incrementar considerablemente. Esto, como ya se conoce, es lo que se denomina un electroimán.

Campo magnético de un toroide

Se acostumbra a llamar toroide a una bobina configurada de manera circunferencial (figura 4.70). En este caso el campo es uniforme y queda prácticamente confinado al interior del toroide.

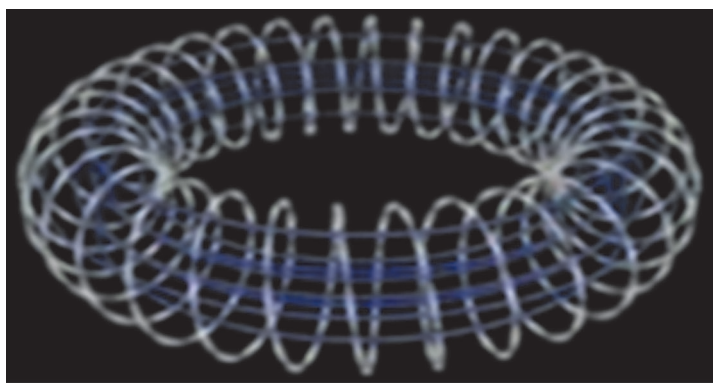


Fig. 4.70 Toroide y líneas de inducción cuando por el conductor circula corriente

El sentido de las líneas de inducción se determina por la regla de la mano derecha, como en el caso de un solenoide o espira y el valor de $\vec{B}$ dentro del toroide, sin núcleo, es decir en el vacío, se puede calcular mediante la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad 4.16$$

En esta expresión N es el número de espiras y r el radio de una circunferencia interior al toroide dada por $r = \frac{R_1 + R_2}{2}$, donde R_1 y R_2 son los radios interior y exterior del toroide.

Problema resuelto 4.5

Por dos conductores paralelos, rectilíneos y de longitud infinita separados 50 cm, circulan corrientes de intensidad 25 A y 75 A.

- Si las corrientes son del mismo sentido, calcula el valor de la inducción magnética en un punto entre los conductores equidistante a ellos y en el plano que los contiene.
- Responde el inciso a) para el caso que las corrientes sean de sentido contrario.
- ¿A qué distancia de los conductores, en el plano considerado, puede ser nula la inducción magnética?

Solución:

En la figura 4.71 se representa la situación planteada: perpendicular al plano del papel dos conductores con corrientes de intensidades $I_1 = 25$ A e $I_2 = 75$ A están separados a una distancia de 0,5 m.

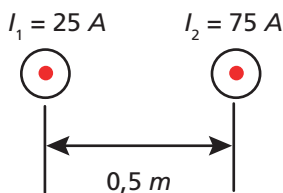


Fig. 4.71

- El valor de la inducción magnética en el punto medio entre los conductores cuando las corrientes son del mismo sentido, se puede determinar aplicando el principio de superposición (figura 4.72)

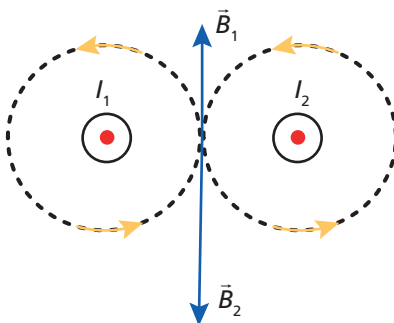


Fig. 4.72

El valor de la inducción es la suma de las proyecciones sobre el eje y de $\vec{B}_2$ y $\vec{B}_1$ (figura 4.73).

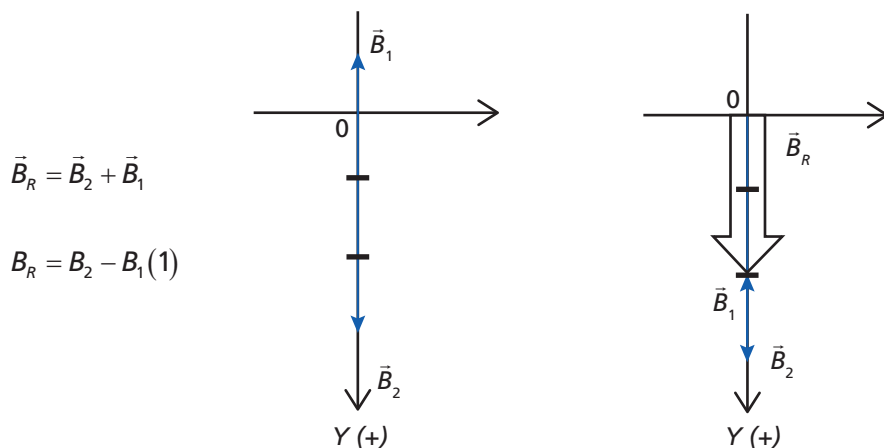


Fig. 4.73

Como el valor del vector inducción magnética, en un punto de un conductor recto con corriente es:

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

Se tendrá que:

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 25 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,25 \text{ m}}$$

$$B_1 = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 75 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,25 \text{ m}}$$

$$B_2 = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Sustituyendo los valores de B_1 y B_2 en (1) queda:

$$B_R = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ T} - 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_R = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

El vector inducción magnética en el punto medio entre los conductores tiene un valor de $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ en dirección vertical y sentido hacia abajo.

- b) Cuando las corrientes son de sentidos contrarios las direcciones y sentidos de $\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$ son iguales (figura 4.74).

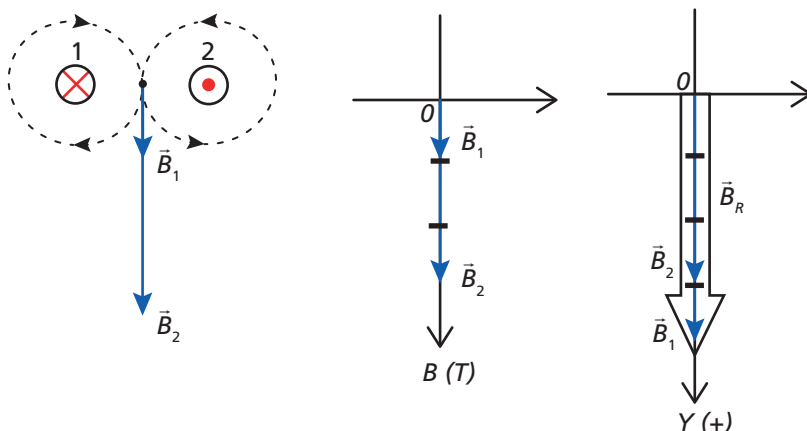


Fig. 4.74

Para las proyecciones de los vectores inducción magnética se tendrá en estas condiciones que:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_2 + \vec{B}_1$$

$$B_R = B_2 + B_1 \quad (2)$$

Como los valores de B_1 y B_2 son los mismos que en el inciso a), al sustituir estos valores en (2) queda:

$$B_R = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T} + 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_R = 8,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

El vector inducción magnética en el punto medio entre los conductores, tienen este caso un valor de $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ en dirección vertical y sentido hacia abajo

- c) Para que la inducción magnética sea nula en un punto del espacio en el plano que contiene a los conductores es necesario que $\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$ tengan iguales direcciones, sentidos contrarios e iguales valores (figura 4.75).

$$\vec{B}_R = \vec{B}_2 + \vec{B}_1$$

$$-B_1 + B_2 = 0$$

$$B_1 = B_2$$

$$\frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot d_1} = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot (0,5 - d_1)}$$

$$25(0,5 - d_1) = 75 d_1$$

$$12,5 - 25 d_1 = 75 d_1$$

$$100 d_1 = 12,5$$

$$d_1 = 0,125 \text{ m}$$

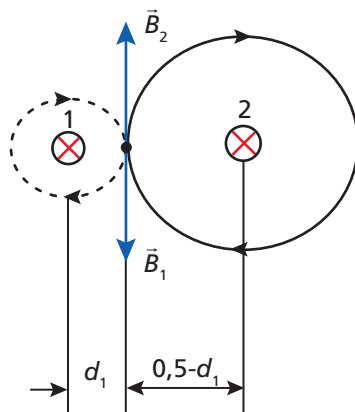


Fig. 4.75

Si las corrientes tienen sentidos contrarios (figura 4.76), entonces, para puntos situados a la izquierda o a la derecha de los conductores se tiene que:

A la derecha de los conductores, se cumple la condición que $\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$ tienen igual dirección y sentidos contrarios, pero no existe ningún punto en el cual el valor de esos vectores sea el mismo para que se cumpla que:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = \vec{0}$$

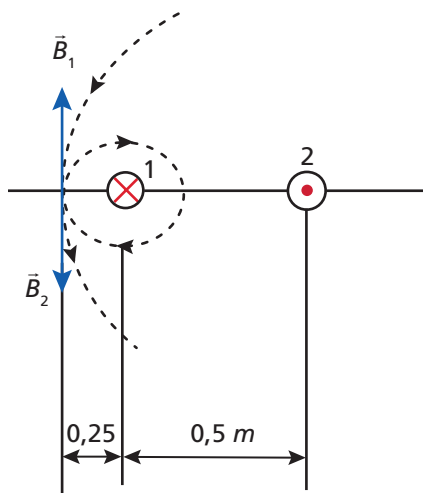


Fig. 4.76

Comprueba tus conocimientos

26. ¿De qué factores depende el valor de la inducción magnética en un conductor muy largo, una espira y un solenoide?
27. Representa el espectro de las líneas de inducción de un pequeño anillo con corriente. Sobre la base del esquema trazado, justifica por qué se le puede considerar como un pequeño imán (dipolo magnético).
28. Representa el esquema de las líneas de inducción de un solenoide. Sobre la base de ese esquema argumenta en que zona el campo se puede considerar uniforme.

4.7 Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos

Conocemos que, en presencia de un campo magnético sobre una partícula cargada puede actuar una fuerza dada por:

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Cuando en la misma región existe, además, un campo eléctrico la fuerza que actúa sobre la partícula será la resultante de la fuerza ejercida por el campo magnético y por el campo eléctrico, a esta fuerza se le denomina

fuerza de Lorentz. Si denotamos a la fuerza de Lorentz por el símbolo $\vec{F}_L$, tendremos que:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_E + \vec{F}_{mag} \quad 4.17$$

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Un importante detalle de la fuerza magnética sobre una partícula cargada en movimiento es el de la característica de la trayectoria que esta puede describir.

Examinemos el caso más simple, pero muy importante y de muchas aplicaciones, de una partícula cargada que se mueve perpendicularmente, con velocidad de valor v , en una zona donde existe un campo magnético uniforme cuya inducción tiene un valor B . En estas condiciones, la fuerza magnética sobre ella será perpendicular en todo momento a las direcciones de los vectores inducción y velocidad (figura 4.77). Como consecuencia, la partícula describirá una trayectoria circular pues la fuerza magnética tendrá el carácter de una fuerza centrípeta.

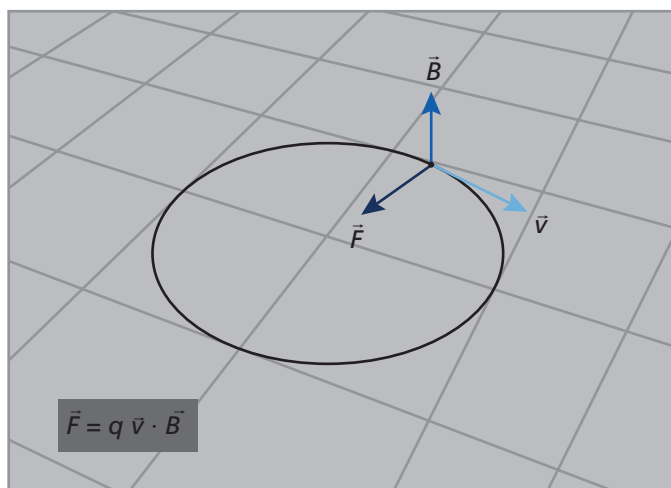


Fig. 4.77 Trayectoria de una partícula cargada cuando se mueve dentro de un campo magnético uniforme. Nota como la fuerza magnética apunta siempre hacia el centro y por ende le imprime a la partícula cargada una aceleración centrípeta

Como sabemos;

$$F_{mag} = qvB\text{sen}\alpha$$

Para el caso que (alfa) sea 90° queda como F_{mag} igual qvB .

Como para la fuerza centrípeta (F_c) se tiene que:

$$F_c = \frac{mv^2}{R}$$

Se tendrá entonces que;

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \quad 4.18$$

De donde se puede encontrar que el radio de la trayectoria que describirá la partícula cargada está dado por:

$$R = \frac{mv}{qB} \quad 4.19$$



De la historia

Sobre la base de esta ecuación 4.19, en 1897, el norteamericano Joseph John Thomson, haciendo uso de un tubo de rayos catódicos, encontró experimentalmente la razón entre la carga y la masa del electrón e/m .

Como resulta relativamente sencillo diseñar un arreglo experimental para medir el radio de la trayectoria que describe una partícula cargada al moverse en el interior de un campo magnético uniforme, si se conoce la carga de la partícula, mediante la ecuación $R = \frac{mv}{qB}$, se puede determinar su masa. Esta es la base del principio de funcionamiento del dispositivo llamado **espectrómetro de masa**.

El **espectrómetro de masa** es un dispositivo que se emplea para separar iones dentro de una muestra que poseen distinta relación carga/masa. La mezcla puede estar constituida por distintos isótopos de una misma sustancia o bien por distintos elementos químicos.



¿Sabías que...?

Francis William Aston (1877-1945) (figura 4.78). El primer espectroscopio de masas fue desarrollado en la década de 1920 por el físico inglés Francis William Aston, y recibió el Premio Nobel de química por su desarrollo.

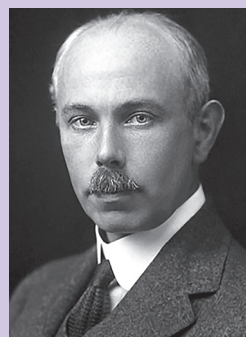


Fig. 4.78

Otra situación sencilla e importante es la que se presenta cuando la partícula cargada penetra en una región donde existen un campo magnético y un campo eléctrico uniformes perpendiculares entre sí, por ejemplo, como se ilustra en la figura (figura 4.79)

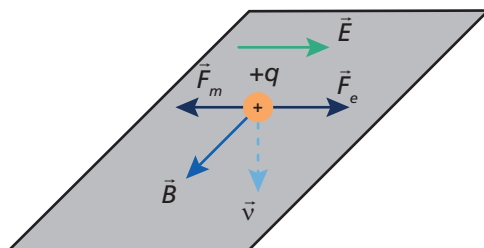


Fig. 4.79 Movimiento de una partícula cargada en “campos cruzados”. En este caso, la fuerza magnética y la eléctrica tienen el mismo valor

En el caso que se representa en la figura 4.79, si el valor de las fuerzas eléctrica y magnética son iguales, la fuerza resultante sobre ella será nula y su estado de movimiento no se alterará. Para que ocurra esto último se debe cumplir que:

$$F_{mag} = F_e$$

$$qvB = qE$$

Despejando v se tiene que:

$$v = \frac{E}{B}$$

Un arreglo o dispositivo de este tipo se denomina selector o filtro de velocidades pues si se hace pasar a través de él un haz de partículas cargadas con diferentes velocidades, es posible ajustar el valor de los campos para que las que tengan determinada velocidad pasen sin desviarse.

Problema resuelto 4.6

Un electrón penetra en la región de un campo magnético uniforme con una velocidad perpendicular a las líneas de inducción. Si el radio de la trayectoria que describe el electrón es de 10 cm, la inducción magnética de $5,0 \cdot 10^{-4}$ T, calcula el valor de la velocidad del electrón y el periodo de su movimiento.

Solución:

Dadas las condiciones del problema se tiene que:

$$F_{mag} = qvB$$

$$F_{mag} = \frac{mv^2}{R}$$

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

Despejando v en esta ecuación y sustituyendo por lo valores numéricos:

$$v = \frac{qRB}{m}$$

$$v = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(10^{-2} \text{ m})(5,0 \cdot 10^{-4}) \text{ T}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}$$

$$v = 8,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

El periodo se puede calcular directamente a partir de:

$$v = \omega \cdot R \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad v = \frac{2\pi}{T} \cdot R$$

$$T = \frac{2\pi R}{v}$$

Sustituyendo por lo valores numéricos se tiene que:

$$T = \frac{2(3,14)(10^{-2})\text{m}}{8,8 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$T = 7,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Problema resuelto 4.7

La figura 4.80 muestra el esquema de un dispositivo para medir la masa de los iones. Un ion de masa m y carga positiva q se produce en la fuente S . Estos iones, que se pueden considerar inicialmente en reposo, son acelerados mediante una diferencia de potencial U y entran con velocidad v en la región donde existe un campo magnético uniforme de inducción $\vec{B}$. Dentro del campo el ion describe una semicircunferencia, chocando con una placa fotográfica a la distancia x de la rendija de entrada.

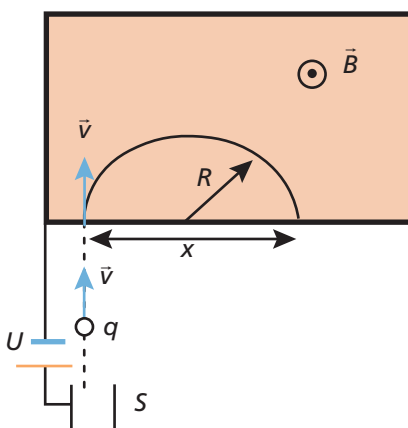


Fig. 4.80

Demuestra que la masa del ion se puede calcular a partir de la expresión:

$$m = \frac{exB}{2v}$$

Solución:

Nota: El campo magnético uniforme en la región se representa con un color (salmón), su dirección con un punto si es perpendicular al plano y hacia afuera y con una cruz si es perpendicular y hacia adentro.

Dado que el ion describe una trayectoria circular, sobre el actuará una fuerza centrípeta dada por:

$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad R = \frac{x}{2}$$

$$F_c = m \frac{2v^2}{x}$$

Donde el valor de la fuerza centrípeta es el de la componente magnética de la fuerza de Lorentz:

$$F_c = F_{mag} = evB$$

Por lo tanto:

$$m \frac{2v^2}{x} = evB$$

De donde se obtiene que:

$$m = \frac{exB}{2v}$$

Problema resuelto 4.8

Un electrón se mueve con una velocidad de valor $6,0 \cdot 10^6$ m/s hacia una región entre dos placas paralelas, separadas 20 mm con una diferencia de potencial de 100 V entre ellas. Si el electrón entra moviéndose perpendicularmente al campo eléctrico entre las placas (figura 4.81), ¿Qué inducción magnética es necesaria, perpendicular tanto a la trayectoria del electrón como al campo eléctrico, para que el electrón viaje en línea recta?

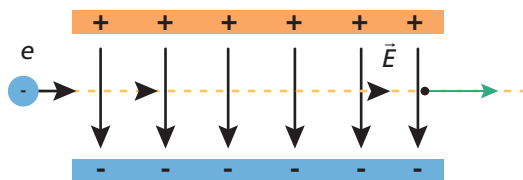


Fig. 4.81

Solución:

La situación planteada en el problema se puede representar de la forma siguiente:

Al penetrar el electrón entre las placas la fuerza de eléctrica sobre el electrón estará dirigida verticalmente hacia arriba.

Si se asume que la fuerza gravitatoria puede no ser considerada, para que electrón no se desvíe de su trayectoria la fuerza magnética debe ser de igual valor que la electrostática y estar dirigida verticalmente hacia abajo.

Por lo tanto, debe cumplirse que:

$$F_e = F_m$$

$$eE = evB$$

De donde:

$$B = \frac{E}{v}$$

Como el campo entre las placas se puede considerar uniforme:

$$E = \frac{U}{d}$$

Donde d es la distancia entre las placas y U la diferencia de potencial entre ellas.

Entonces:

$$B = \frac{U}{vd}$$

$$B = \frac{1,0 \cdot 10^2 \text{ V}}{(6,0 \cdot 10^6 \text{ m/s})(2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m})}$$

$$B = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

El sentido de la inducción magnética debe ser “saliendo” del plano del papel. Compruébalo, aplicando la regla de la mano derecha.

Comprueba tus conocimientos

- 29.** Plantea la ecuación de la fuerza de Lorentz. Explica el significado físico de cada uno de sus componentes.
- 30.** ¿Cómo se utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido de la fuerza magnética que actúa sobre una partícula, con carga positiva en movimiento?

31. Representa la dirección y el sentido de la fuerza magnética en cada uno de los casos que se muestran en la figura 4.82.

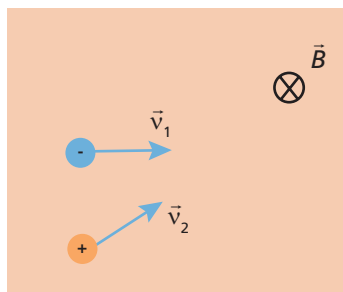


Fig. 4.82

32. En la figura 4.83 se representa, en los puntos A y B, cañones electrónicos que disparan electrones con una velocidad v . Traza la trayectoria aproximada que sigue el haz de electrones en cada caso. El campo magnético representado es extenso y de gran intensidad.

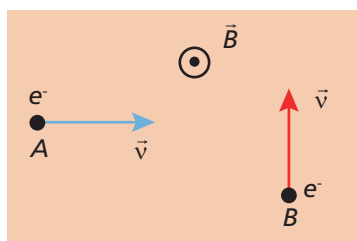


Fig. 4.83

4.8 Fuerza de Ampere

Así como una partícula cargada en movimiento (no paralelo a la dirección de $\vec{B}$) es afectada por una fuerza magnética, es natural que esta fuerza también afecte a una corriente eléctrica (considerada como un gran número de cargas en movimiento) y al conductor como un todo.

En el caso particular de un conductor recto de longitud l por el que circula una corriente de intensidad I , colocado en un campo magnético uniforme cuya intensidad tiene un valor B , se puede demostrar que el valor de la fuerza magnética sobre el conductor está dado por:

$$F_{mag} = I l B \sin \alpha \quad 4.20$$

Esta ecuación expresa que el valor de la fuerza magnética que actúa sobre un conductor con corriente es directamente proporcional a la longitud del conductor (l) que se encuentre en el seno del campo magnético; al valor del vector inducción magnética (B); al valor de la intensidad de la corriente (I) y al seno del ángulo formado entre las líneas de inducción y la dirección en que fluye la corriente.

A la fuerza dada por esta ecuación se le conoce como **fuerza de Ampere**.

Debe notarse que la fuerza es nula si el conductor es paralelo a las líneas de inducción del campo y máxima si es perpendicular y que la dirección de esta fuerza es perpendicular al plano formado por el conductor y las líneas de inducción magnética, y su sentido se puede determinar utilizando la regla de la mano derecha.



De la historia

André-Marie Ampere (1775-1836), físico francés (figura 4.84). Se le acredita el descubrimiento del electromagnetismo, o sea, la correspondencia entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.



Fig. 4.84



Saber más

Fuerza de Ampere

Analicemos cómo deducir la fuerza de Ampere.

La fuerza de ampere que se ejerce sobre un conductor, de longitud l por el que circula una corriente de intensidad I colocado en el seno de un campo magnético de inducción B es la resultante de la fuerza magnética que actúa sobre cada uno de los portadores de carga eléctrica en movimiento, es decir:

$\vec{F}_{mag} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$, donde N es el número total de portadores de carga en movimiento.

Si se asume que las fuerza sobre todos los portadores tiene el mismo valor, dirección y sentido, entonces:

$$F_{mag} = N \cdot q \cdot v \cdot B \sin \alpha$$

El número total de portadores de carga en movimiento es igual a concentración de portadores, n_0 por volumen V del conductor, o sea:

$N = n_0 V$ $V = lS$, donde S es el área de la sección transversal del conductor.

Por lo tanto, se puede escribir que:

$$F = n_0 l S q v B \sin \alpha$$

$$\text{Pero } I = n_0 q v S$$

Se tiene entonces que:

$$F_{\text{mag}} = l B \sin \alpha$$

Problema resuelto 4.9

Calcula el valor de la fuerza magnética entre dos conductores rectos de longitud l , separados una distancia r ($r \ll l$), por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I en el mismo sentido.

Solución:

La situación planteada en el problema se puede representar de manera esquemática (figura 4.85):

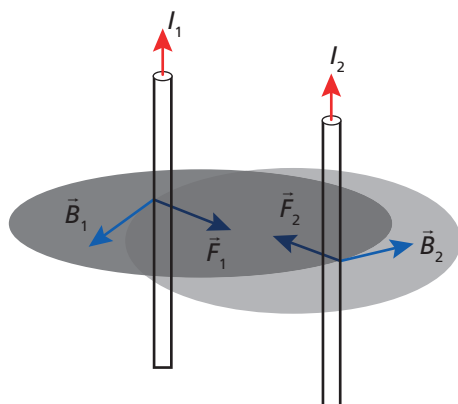


Fig. 4.85

El módulo del campo magnético B_1 inherente al conductor por el que circula la corriente de intensidad I_1 se puede calcular a partir de la expresión:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

El sentido de este campo magnético se determina aplicando la regla de la mano derecha (el dedo pulgar indica el sentido de la corriente y la punta del resto de los dedos indica el sentido de B).

El marco está formado por 15 vueltas de alambre aislado. Una vez que el sistema está equilibrado, se hace pasar una corriente de 0,5 A por el marco. Entonces es necesario colocar en el plato derecho masas, con un valor de 60 g, para equilibrar de nuevo la balanza. ¿Cuál es el sentido y valor de la inducción magnética en la región sombreada?

Solución:

Datos:

$$N = 15 \text{ espiras}$$

$$I = 0,5 \text{ A}$$

$$m = 60 \text{ g}$$

$$l = 0,08 \text{ m}$$

$$\vec{B} \rightarrow ?$$

La fuerza magnética es igual a la fuerza que actúa sobre las masas que equilibran la balanza, o sea:

$$F_M = F_g = mg$$

$$F_M = 0,06 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F_M = 0,6 \text{ N}$$

La fuerza que actúa sobre una de las espiras es:

$$F_A = I l B \sin \theta$$

Como hay 15 espiras, entonces:

$$F_M = 15 F_A$$

$$F_M = 15 I l B \sin \theta$$

$$B = \frac{F_M}{15 I l}$$

$$B = \frac{0,6 \text{ N}}{15 \cdot 0,5 \text{ A} \cdot 0,08 \text{ m}}$$

$$B = 1 \text{ T}$$

Comprueba tus conocimientos

- 33.** Explica, desde el punto de vista microscópico, las causas que dan lugar a la fuerza de Ampere.
- 34.** Plantea la ecuación de la fuerza de Ampere. Explica el significado físico de cada uno de los factores que contempla esta ecuación.
- 35.** ¿Cómo se determina el sentido de la fuerza de Ampere?

36. Determina el sentido de la fuerza de Ampere en cada uno de los casos que se muestran en la figura 4.87

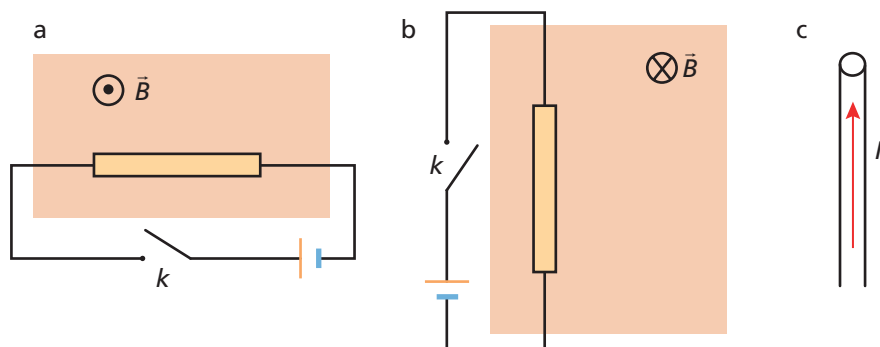


Fig. 4.87

4.9 Propiedades magnéticas de la sustancia. Hipótesis de Ampere

Al estudiar el campo magnético como forma de la materia solo se valoraron las características del circuito al que está vinculado, sin considerar la influencia que puede ejercer el medio circundante, es decir, la sustancia en la cual se manifiesta el campo (por ejemplo, el aire o cualquier otro cuerpo, como los núcleos de hierro sobre los cuales se montan las bobinas de los motores eléctricos).

Ya conoces que el campo electrostático se modifica de acuerdo con el dieléctrico presente en su interior, y de la constante dieléctrica.

Recuerda que el campo eléctrico resultante en el interior de un dieléctrico es menos intenso que en el vacío, y se calcula mediante la ecuación:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

¿Se comportan las diferentes sustancias, en el caso del campo magnético, de la misma forma que los dieléctricos en el campo eléctrico?

Si se coloca una sonda magnética en el extremo de una bobina o de un solenoide como se muestra en la figura 4.88 y la bobina se conecta a una fuente de corriente directa, la sonda detecta la presencia de su campo magnético. El valor $\vec{B}_0$ de la inducción magnética en la zona donde está la sonda se puede valorar cuantitativamente con ella.

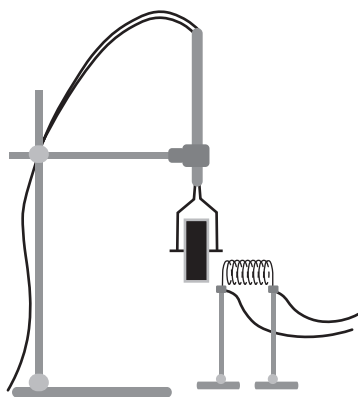


Fig. 4.88 Con una sonda magnética, se puede conocer las características magnéticas de las sustancias

Al introducir en el interior de la bobina una porción cilíndrica de hierro y después una de aluminio, se observa que el campo magnético, en el primer caso, se intensifica de forma manifiesta, en el segundo caso varía muy poco.

¿Cómo interpretar este resultado?

La modificación que indica la sonda en valor de la inducción magnética se debe a que a la inducción de la bobina $\vec{B}_0$ se le suma geoméricamente la inducción debida a la magnetización de la sustancia $\vec{B}$. Es decir:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_0 + \vec{B}$$

El valor de la inducción magnética resultante, $\vec{B}_R$, se puede calcular también mediante la ecuación:

$$\vec{B}_R = \mu \cdot \vec{B}_0$$

Donde μ es una constante que expresa el grado en que se magnetiza la sustancia analizada, recibe el nombre de permeabilidad magnética, indica cuántas veces varía la inducción magnética en una región del medio al colocar en ella una sustancia determinada.

Todas las sustancias se magnetizan en mayor o menor grado. De acuerdo con el grado y el sentido en que se magnetizan se clasifican en tres grupos: diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas.

Las sustancias diamagnéticas se magnetizan débilmente y en sentido contrario a $\vec{B}_0$. En estas la permeabilidad magnética μ resulta ser negativa y algo menor que uno. Un ejemplo representativo de una sustancia con estas características es el Bismuto. Si se introduce una muestra de este material en el interior de una bobina, entonces el campo magnético resultante es algo menor que $\vec{B}_0$.

Los paramagnéticos y los ferromagnéticos se magnetizan en el mismo sentido de $\vec{B}_0$. Por esta razón, la inducción resultante en estos materiales es mayor que $\vec{B}_0$. En los paramagnéticos es solo algo mayor $\vec{B}_0$ ($\mu > 1$); en los ferromagnéticos es mucho mayor que $\vec{B}_0$ ($\mu \gg 1$).

Las causas por las cuales los cuerpos presentan propiedades magnéticas fueron planteadas por Ampere, quien expresó que estas propiedades en cualquier cuerpo están determinadas por pequeñas corrientes que circulan en su interior.

Es el movimiento de los electrones en los átomos y moléculas el que determina que ellos se comporten como pequeños dipolos magnéticos.

¿Cómo explicar que una porción de hierro, en condiciones normales, no manifieste efectos magnéticos?

¿Cómo se magnetiza un núcleo de hierro?

¿Por qué existen imanes permanentes?

Centraremos nuestra atención en los materiales ferromagnéticos. Por ejemplo, un pedazo de hierro. En él las corrientes electrónicas, mediante la acción de sus propios campos magnéticos, tienden a formar asociaciones o agrupaciones de átomos que se manifiestan como dipolos magnéticos. En condiciones normales, estos dipolos o dominios (que es como se denominan en los ferromagnéticos) se encuentran totalmente desordenados y la inducción magnética resultante es nula figura 4.89.

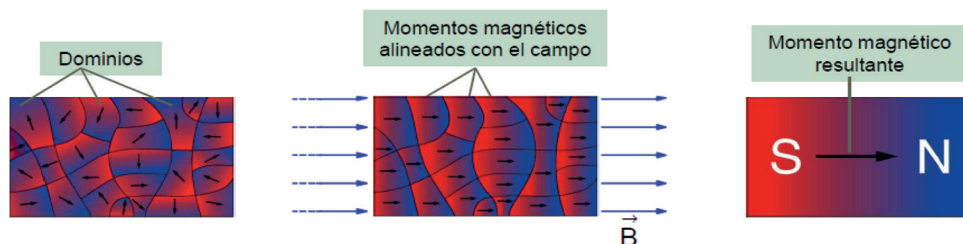


Fig. 4.89 En un material ferromagnético la acción de un campo magnético externo orienta de forma permanente a los dominios magnéticos

Al colocar la porción de hierro en el interior de un campo magnético débil, algunos de los dipolos tienden a orientarse en el mismo sentido de la inducción $\vec{B}_0$. Si se continúa incrementando el valor de $\vec{B}_0$ entonces se irán orientando cada vez más los dipolos atómicos, hasta que todos queden orientados en la dirección y sentido $\vec{B}_0$. En estas condiciones se dice que el material se magnetizó a saturación, y la inducción

magnética resultante se refuerza con el aporte del campo de los dipolos orientados (figura 4.90).

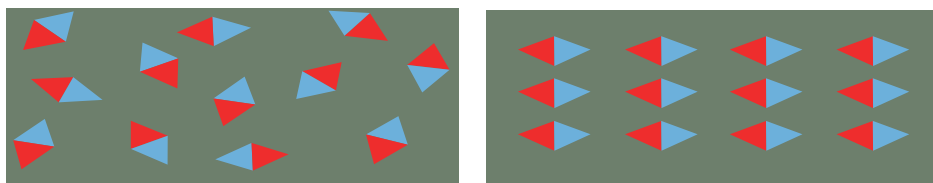


Fig. 4.90 a) Disposición de los dipolos magnéticos en un material no imantado;
b) Disposición de los dipolos magnéticos en un material imantado

Algunos tipos de materiales ferromagnéticos al ser extraídos del campo se desmagnetizan con rapidez. Sus dipolos se desorientan y no manifiestan efectos magnéticos. Estos ferromagnéticos se denominan blandos, y se utilizan en la confección de los núcleos de los motores y generadores. Un ejemplo representativo es el denominado hierro dulce.

Existen otros materiales ferromagnéticos que, después ser extraídos del campo inductor o cesar la acción del campo que magnetiza, conservan cierta magnetización porque sus dipolos atómicos permanecen orientados. Estos ferromagnéticos se denominan duros y se emplean en la confección de imanes permanentes en la elaboración de cintas magnetofónicas de video y discos de computadoras con memoria magnética. Un ejemplo de ellos son las denominadas ferritas.

Aplicaciones

Motores eléctricos

Los motores eléctricos constituyen una de las aplicaciones más conocidas y generalizadas de la fuerza de ampere.

La rotación de la espira en el campo magnético se debe a la fuerza que actúa sobre los lados de las espiras del enrollado del motor, cuando por ellas circula la corriente eléctrica (figura 4.91).

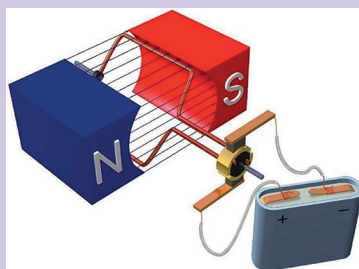


Fig. 4.91

Ciclotrón

Un ciclotrón es un dispositivo que puede acelerar partículas con carga a considerables velocidades. Las partículas energéticas producidas son utilizadas para bombardear los núcleos atómicos, produciendo así reacciones nucleares de interés para los investigadores.

Altavoces

Un altavoz (figura 4.92) también trabaja de acuerdo con el principio de que un imán ejerce una fuerza sobre un alambre que conduce corriente. La salida eléctrica de un aparato estéreo o un televisor está conectada a los cables que llegan al altavoz. Los cables están conectados internamente a una bobina de alambre, la cual, a la vez, está unida al cono del altavoz. El cono del altavoz, por lo general, está hecho de cartón endurecido y está montado de manera que

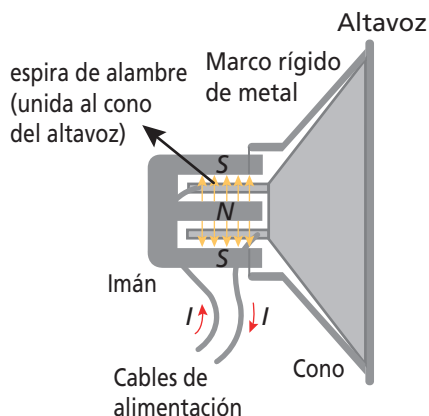


Fig. 4.92

puede moverse hacia atrás y delante libremente. Un imán permanente está montado directamente en línea con la espira de alambre. Cuando una corriente alterna de una señal de audio fluye a través de la espira de alambre, la cual puede moverse libremente dentro del imán, la espira experimenta una fuerza debida al campo magnético del imán. Conforme la corriente se alterna con la frecuencia de la señal de audio, la bobina y el cono del altavoz al que está unida se mueven hacia atrás y delante con la misma frecuencia, produciendo compresiones y rarefacciones alternas del aire adyacente, así como ondas sonoras. De esta forma, un altavoz transforma la energía eléctrica en energía sonora, y las frecuencias e intensidades de los sonidos emitidos son una reproducción exacta de la señal eléctrica de entrada.

Galvanómetro

El componente básico de los medidores analógicos (aquellos con una aguja y una escala), incluyendo amperímetros, voltímetros y óhmetros analógicos, es un galvanómetro (figura 4.93), este dispositivo consiste en una bobina de alambre (con una aguja unida) suspendida en el campo magnético de un imán permanente. Cuando la corriente fluye a través de

la espira de alambre, el campo magnético ejerce un torque sobre la espira, que se contrarresta con un resorte que ejerce un torque aproximadamente proporcional al ángulo girado (ley de Hooke).

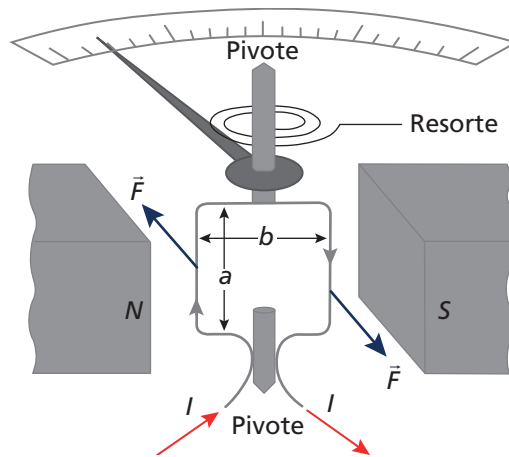


Fig. 4.93

Espectrómetro de masas

Un espectrómetro de masas (figura 4.94) es un dispositivo para medir masas atómicas. Actualmente este aparato se emplea no solo en física, sino también en química, geología y medicina, y a menudo para identificar átomos (y su concentración) en muestras dadas. Como se ilustra en la figura, se producen iones por calentamiento, o mediante una corriente eléctrica, en la fuente o muestra S . Generalmente, las partículas después de haber sido aceleradas, pasan a través de una rendija S_1 y entran a una región de campos eléctricos y magnéticos cruzados. Los iones siguen trayectorias rectas en ese "selector de velocidad", si la fuerza eléctrica qE se equilibra con la fuerza magnética qvB ; esto es, si $qE = qvB$, o si $v = E/B$. De esta forma, solo aquellos iones cuya velocidad cumpla la condición anterior, pasarán sin desviarse y emergerán a través de la rendija S_2 . En la región semicircular después de S_2 solo hay un campo magnético $\vec{B}$, así que los iones siguen una trayectoria circular. El radio de la trayectoria circular se encuentra a partir de las marcas que dejan los iones en una película (o en un detector).

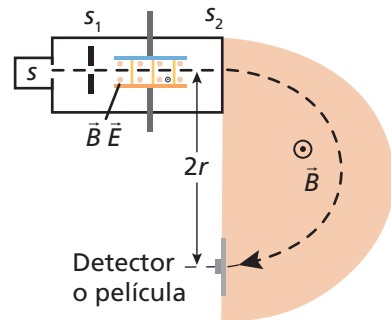


Fig. 4.94

Resonancia magnética

Una resonancia magnética es un examen imagenológico que utiliza imanes y ondas de radio potentes para crear imágenes del cuerpo sin emplear rayos x.

La resonancia magnética es un reciente avance tecnológico para el diagnóstico preciso de múltiples enfermedades, aún en etapas iniciales.

De manera muy general, el proceso para producir estas imágenes consiste en someter al paciente a un campo electromagnético empleando un equipo (figura 4.95) que, entre otros componentes, tiene un imán de 1,5 T (equivalente a 15 mil veces el campo magnético de nuestro planeta).



Fig. 4.95

Este poderoso imán atrae a los protones que están contenidos en los átomos de hidrógeno que conforman los tejidos humanos, los cuales, al ser estimulados por las ondas de radio frecuencia, salen de su alineamiento normal. Cuando el estímulo se suspende, los protones regresan a su posición original, liberando energía que se transforma en señales de radio que son captadas y procesadas mediante una computadora que las transforma en imágenes, que describen la forma y funcionamiento de los órganos.

Comprueba tus conocimientos

- 37.** ¿Cómo se clasifican las sustancias de acuerdo con el grado y sentido en que se magnetizan?
- 38.** Di las características de las sustancias diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas.

39. Explica por qué se desmagnetiza un imán permanente si se calienta o golpea.
40. Describe cómo funcionan los dispositivos mencionados como aplicaciones del magnetismo y mencione otras aplicaciones.

Tareas generales del capítulo

1. Calcula el valor de la inducción magnética en una región del espacio en la que la fuerza que actúa sobre un electrón que se mueve con una velocidad de $1,0 \cdot 10^7$ m/s es de $1,0 \cdot 10^{-12}$ N.
2. En la figura 4.96 se muestra la forma en que se orienta una aguja magnética en el interior de un solenoide. Representa las líneas de inducción del solenoide y el sentido de la corriente en el enrollado.

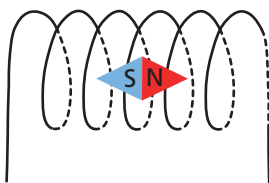


Fig. 4.96

3. Representa en el punto A, los vectores inducción magnética inherentes a cada corriente de los dispositivos modelados, un solenoide y un conductor muy largo y recto figura 4.97.

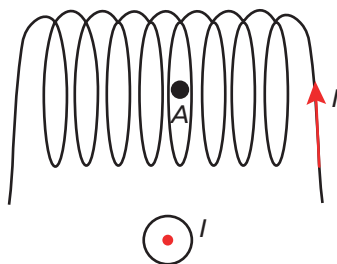


Fig. 4.97

4. Calcula el valor de la inducción magnética en la parte central de un solenoide de 40 cm de longitud constituido por 200 espiras, por la que circula una corriente de 12 A.
5. En una región donde existen al mismo tiempo un campo eléctrico y un campo magnético uniforme se mueve un electrón por una trayectoria

rectilínea. Se conoce que la intensidad del campo eléctrico es igual a $\vec{E}$. Explica cuál debe ser el valor de la inducción magnética $\vec{B}$ del campo magnético, para que el electrón no se desvíe de su trayectoria rectilínea, si:

- las líneas de fuerza del campo eléctrico coinciden en dirección y sentido con las de inducción del campo magnético, y el electrón se mueve en la misma dirección de ambos;
 - la dirección de la velocidad es perpendicular a las direcciones de $\vec{E}$ y de $\vec{B}$, que a su vez son perpendiculares entre sí.
6. Determina si las proposiciones siguientes son verdaderas o falsas:
- El campo magnético terrestre es uniforme.
 - Alejada de toda sustancia ferromagnética, la aguja de una brújula toma la orientación del campo magnético terrestre.
 - La intensidad del campo magnético terrestre es siempre despreciable en relación a la intensidad del campo magnético creado por un imán.
 - Las líneas de campo de un campo magnético no se cortan jamás.
 - Dentro de un campo magnético uniforme, las líneas del campo son paralelas.
 - Para obtener el espectro magnético (por ejemplo, de un imán recto), se pueden utilizar limallas de un metal cualquiera.
7. Una espira circular metálica acoplada a un soporte, como muestra la figura 4.98, está siendo recorrida por una corriente producida por una fuente de alimentación de energía eléctrica. Tomando de referencia la figura:

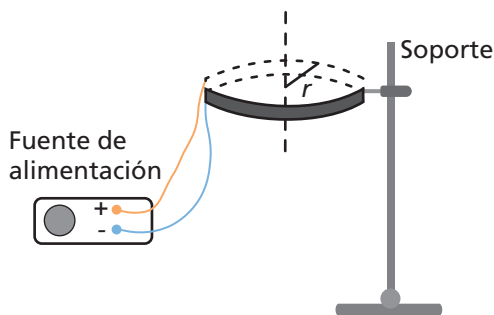


Fig. 4.98

- Señala en la espira el sentido en que circula la corriente eléctrica.
- Representa las líneas de inducción magnética del campo magnético asociado con dicha corriente.

- c) ¿Cuál cara de la espira se comporta como un polo Norte magnético y cuál como Sur?
- d) Si la corriente que produce la fuente es de 1,0 mA, calcula el valor que tendrá en el centro de esta espira la inducción magnética. Toma que su radio es de 20 cm.
- e) ¿Si la espira fuera contraída (se redujeran sus dimensiones en una cuarta parte), seguiría teniendo la inducción el mismo valor? Explica tu respuesta.
8. Por el solenoide representado en la figura 4.99, que posee cien espiras, circula una corriente de 10 mA:

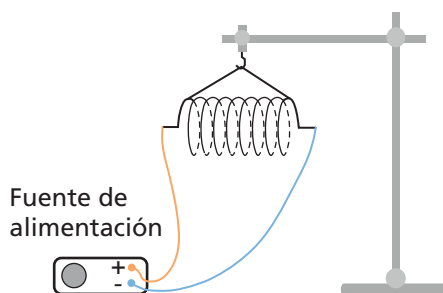


Fig. 4.99

- a) Calcula el valor de la inducción magnética en su parte central e indica la polaridad magnética en sus caras.
- b) El valor de la inducción en su centro se duplica, ¿en cuántas veces habrá cambiado el valor de la intensidad de la corriente que circula por él? Argumenta tu respuesta.
- c) Explica un procedimiento mediante el cual podemos intensificar el campo magnético en el centro del solenoide.
9. Un solenoide está siendo recorrido por una corriente. Una aguja magnética colocada delante de una de sus caras se orienta como muestra la figura 4.100:

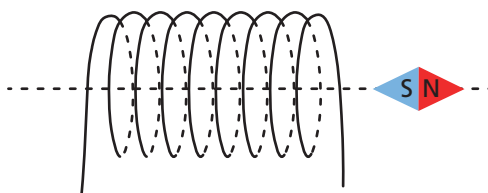


Fig. 4.100

- a) Indica cual es el polo Norte del solenoide y cual el Sur.

una corriente (figura 4.103). Como resultado de ello en el centro de la espira la inducción magnética toma el valor de μT .

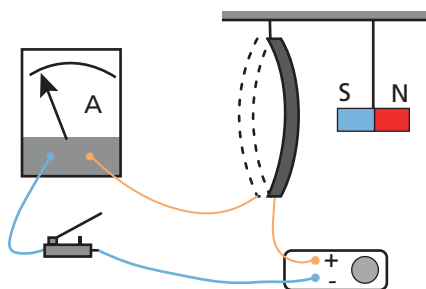


Fig. 4.103

- Determina el valor de la intensidad de la corriente que registra el amperímetro.
- Determina el valor del diámetro de la espira.
- Indica el sentido de la corriente en la espira y represente el campo magnético asociado a ella.
- ¿Permanecerá el imán suspendido del hilo en la misma posición al cerrar el interruptor? Explica tu respuesta.

Determina la intensidad de la corriente en un conductor, si este atrae hacia sí con la fuerza de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ a otro conductor paralelo que posee la longitud de $2,8 \text{ m}$ por el cual circula una corriente de 58 A . ¿Qué dirección tendrán las corrientes en ambos conductores? La distancia entre los conductores es de 12 cm .

- 13.** En la figura 4.104 se muestran dos conductores rectilíneos largos de longitud $2,0 \text{ m}$ separados una distancia de 10 cm . Al hacer pasar por ellos corrientes de intensidades I_1 e I_2 , se repelen mutuamente con una fuerza de $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ N}$:

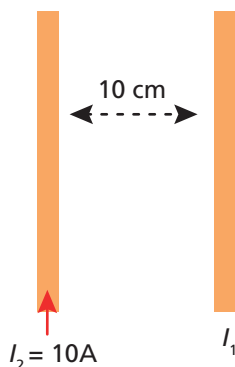


Fig. 4.104

- Representa el vector fuerza magnética de interacción entre los conductores.
- Determina la inducción magnética asociada a la corriente que circula por el conductor 2 a lo largo de la línea que ocupa el conductor 1. Representa las líneas de inducción del campo magnético $\vec{B}$.
- Determina el valor y sentido de la intensidad de la corriente que pasa por el conductor 1.
- Determina la inducción magnética resultante en el punto medio entre los conductores.

14. Un conductor circular con radio de 5,2 cm y corriente $I_1 = 13,4$ A y otro conductor rectilíneo con corriente $I_2 = 22$ A se encuentran en un mismo plano (figura 4.105). El conductor rectilíneo dista del centro de la espira circular 8,3 cm. Hallar la inducción magnética resultante del campo magnético de cada corriente en el centro de la espira. ¿Cuál será la inducción en ese mismo punto, si el sentido de la corriente en el conductor rectilíneo cambia?

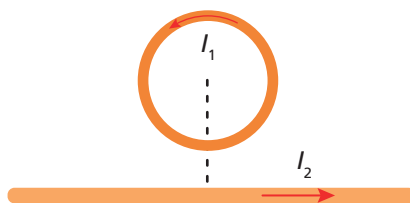


Fig. 4.105

15. Una partícula de masa $4,8 \cdot 10^{-10}$ kg y carga $1,6 \cdot 10^{-7}$ C, se mueve como muestra la figura 4.106 con una velocidad de 10 m/s en dirección perpendicular a las líneas de un campo magnético de inducción 1,0 T:

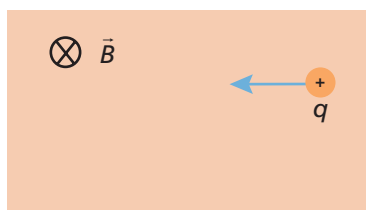


Fig. 4.106

- Representa la fuerza magnética que actúa sobre la partícula.
- Determina el radio de la trayectoria descrita por la partícula dentro del campo magnético.

16. En la figura 4.107 se representan las trayectorias seguidas por haces de protones, electrones y neutrones, al penetrar por el punto A con idéntica velocidad de $2,0 \cdot 10^5$ m/s hacia una región en la que existe un campo magnético uniforme de inducción $4,0 \cdot 10^{-2}$ T:

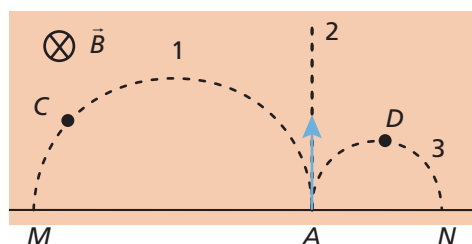


Fig. 4.107

Identifica los haces de cada partícula según sus trayectorias.

- Representa los vectores $\vec{F}_M$ y $\vec{v}$ de las partículas en los puntos C y D de la figura.
- Determina el radio del arco de circunferencia descrito por los protones.
- ¿Qué tiempo emplean los protones en recorrer la región de campo magnético, antes de proyectarse nuevamente en el plano MN?

Datos: $m_p = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $q_p = q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- 17.** Un haz de partículas α se desplaza en dirección horizontal con una velocidad de $4,0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$. En el momento en que pasaba por el punto A, es conectado en toda la región un campo magnético uniforme que obliga a las partículas a describir la trayectoria circular de radio 10 cm representada en la figura 4.108:

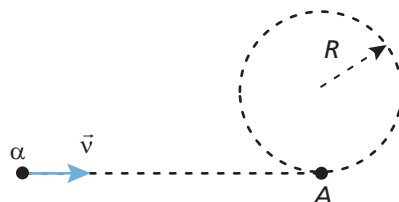


Fig. 4.108

- ¿Cuál es el valor, dirección y sentido del campo magnético conectado en la región?
- ¿Qué tiempo demoran las partículas en volver a pasar por el punto A?
- ¿Con qué aceleración se mueven las partículas dentro del campo magnético?

Datos: $m_\alpha = 6,4 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_\alpha = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- 18.** Un electrón tiene en el punto A de la figura 4.109, una velocidad de 10^6 m/s en el sentido indicado. De acuerdo con los datos que aparecen:

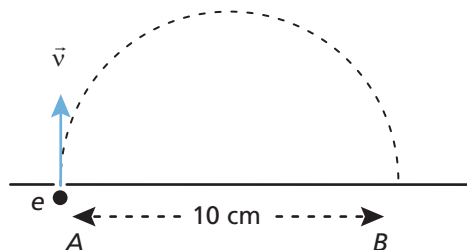


Fig. 4.109

- Señala la dirección y sentido de las líneas de inducción del campo magnético uniforme que debe extenderse por encima del plano AB.
 - Calcula el valor de la inducción que obligará al electrón a seguir la trayectoria semicircular de A hasta B.
 - ¿Qué tiempo demora la partícula en moverse desde A hasta B?
- 19.** Un campo magnético de inducción $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ es perpendicular a un campo eléctrico de intensidad 100 N/C . Un haz de electrones que se

desplaza a cierta velocidad $\vec{v}$ se introduce en el espacio de estos campos, siendo la velocidad de estos perpendicular al plano que forman los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$. Calcular:

- Velocidad $\vec{v}$ de los electrones si al entrar en la región la atraviesan sin desviarse.
- Radio de curvatura de la trayectoria de los electrones, si se conecta solo el campo magnético.
- Aceleración de estas partículas, si se conecta solo el campo eléctrico.

- 20.** En la figura 4.110 se representan dos placas planas paralelas de longitud 1,0 m, separadas una distancia de 2,0 cm. En toda la región entre estas se extiende un campo magnético homogéneo de inducción $5,0 \cdot 10^{-5}$ T en el sentido indicado. Desde el punto A, que se muestra en la figura, el cual equidista de ambas placas, se lanza un haz de partículas α en dirección paralela a estas con una velocidad de 10^4 m/s:

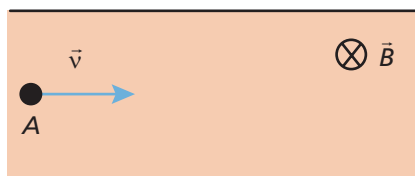


Fig. 4.110

- Calcula la intensidad del campo eléctrico que debe ser conectado entre las placas, para que el haz de partículas no se desvíe de su dirección incidente. Representa las líneas de fuerza.
- Si se desconecta el campo magnético, ¿qué tipo de trayectoria describen las partículas? Calcula la aceleración con que se mueven entre las placas.
- Si se desconecta el campo eléctrico, conectando de nuevo el magnético, ¿cuál será el mínimo valor de la inducción magnética con el cual el haz abandonará la región entre las placas en sentido contrario al de incidencia?

CAPÍTULO 5

Inducción electromagnética

Después del descubrimiento de Oersted, que evidenció la estrecha relación existente entre la corriente eléctrica y el campo magnético, se iniciaron múltiples investigaciones para buscar un posible efecto inverso, es decir, obtener corriente eléctrica a partir de los fenómenos magnéticos. En 1931 Michael Faraday dio solución a esta interrogante abriendo las puertas a importantísimas aplicaciones prácticas para el desarrollo de nuestra civilización y al muy fértil campo de lo que hoy conocemos como electrodinámica.



De la historia

Michael Faraday (1791-1867) fue un brillante físico y químico del Reino Unido (figura 5.1), cuyos principales aportes a la ciencia fueron sus estudios sobre la inducción electromagnética y la electrólisis. Adquirió su gusto por leer y por las investigaciones, desde los 14 años, cuando trabajó de encuadernador de libros en Londres.

M. Faraday fue capaz de visualizar el campo electromagnético en toda su extensión estudiándolo sobre la base de las líneas de fuerza, cuando aún estos conceptos no eran del todo aceptados por el mundo científico de la época.

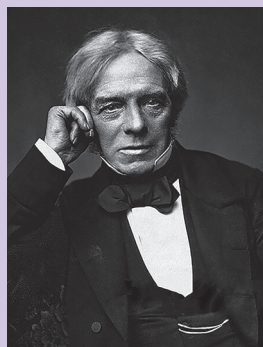


Fig. 5.1

¿Qué papel ha jugado el descubrimiento de Faraday de la inducción electromagnética en la vida moderna, la ciencia, la tecnología, la sociedad y en la preservación del medio ambiente? ¿Cuál es la esencia del fenómeno de la inducción electromagnética? ¿Cuáles actitudes de Michael Faraday lo

hacen ser un ejemplo que se debe seguir en la formación de valores morales y científicos? ¿Qué aplicaciones tiene el fenómeno de la inducción electromagnética en la sociedad, la ciencia, la vida cotidiana y la tecnología contemporánea? ¿Cómo funcionan las centrales generadoras de corriente eléctrica basados en el fenómeno de la inducción electromagnética? ¿Cuáles son los diferentes tipos de generadores que existen?

Las preguntas anteriores apuntan en la dirección de algunas cuestiones básicas que serán abordadas en este capítulo.

5.1 Fenómeno de la inducción electromagnética. Flujo del vector inducción magnética

El fenómeno de la inducción electromagnética

Muchos investigadores buscaron durante años la relación inversa demostrada en el experimento de Oersted, es decir, la obtención de corrientes a partir de un campo magnético. Por ejemplo, Ampere, junto con Auguste Arthur de la Rive (1801-1873), físico suizo, realizó un experimento para obtener corrientes eléctricas por influencia de otras, pero no llegaron a interpretar físicamente este fenómeno.



De la historia

El 3 de septiembre de 1821 había comenzado Michael Faraday su primera investigación experimental en electricidad: el giro de un polo magnético alrededor de una corriente eléctrica y a la inversa, el giro de un conductor rectilíneo alrededor de un polo magnético sumergido en mercurio. Es el primer motor eléctrico, anterior incluso al que construyó Peter Barlow (1776-1862), matemático y físico británico, en marzo de 1822.

El motor o rueda de Barlow, es un disco de cobre que está situado entre los polos de un imán y cuyo borde está en contacto con un pequeño depósito de mercurio (figura 5.2). Si se conecta una batería entre el eje de la rueda y el depósito de mercurio se observa que la rueda empieza a girar alcanzando una velocidad angular límite constante, que es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica.

En 1824 Faraday realiza infructuosamente los primeros intentos para lograr las corrientes inducidas. En ese mismo año Francois Jean Dominique Arago (1786-1853), matemático, físico, astrónomo y político francés, observa que las oscilaciones de una aguja magnética se amortiguan al colocar un disco metálico debajo de ella, y que al girar el disco gira la aguja. Es el magnetismo de rotación de Arago. Este descubrimiento hubiera dado origen al descubrimiento del fenómeno de las corrientes inducidas si se hubiera interpretado debidamente.

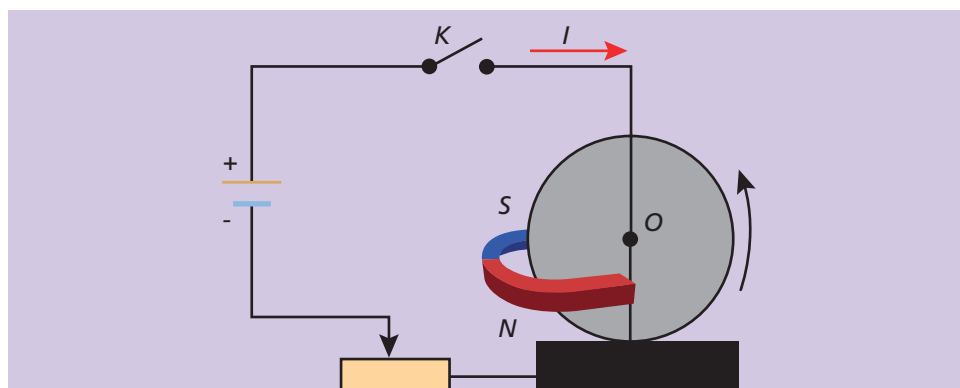


Fig. 5.2

Jean Bernard León Foucault (1819-1868), físico francés, investigó más adelante estas corrientes y John Tyndall (1820-1893), físico irlandés, construyó un péndulo hueco que contenía un metal de bajo punto de fusión. La energía disipada por las oscilaciones calentaba el metal que se fundía y goteaba.

El 29 de agosto de 1831 Faraday, en uno de sus experimentos, observó que si se colocaban dos conductores en forma de espiras cerradas A y B muy cerca uno del otro (figura 5.3) y a través de A circulaba una corriente producida por una batería, en el conductor B aparecía una corriente eléctrica, a la que se denomina corriente inducida, cosa que solo ocurría en los momentos de establecer o cortar la corriente en el conductor A. Si la corriente por A se mantenía constante, no existía ningún efecto en B.

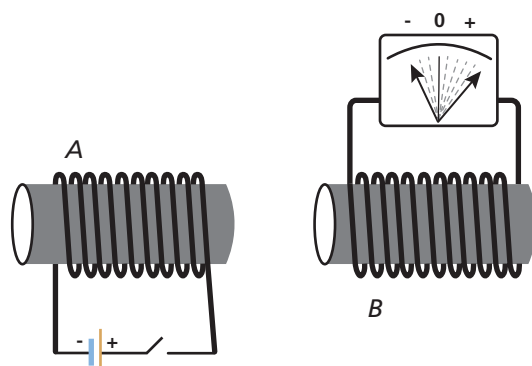


Fig. 5.3 Representación contemporánea de uno de los experimentos de Faraday

A partir de este resultado, Faraday diseñó y llevó a vías de hecho toda una serie de experimentos para esclarecer más sus ideas, lo que condujo

finalmente al descubrimiento y explicación del fenómeno de la inducción electromagnética.

Los resultados de los experimentos realizados por Faraday fueron publicados en 1832 en la *Philosophical Transactions de la Royal Society* (Transacciones Filosóficas de la Real Sociedad) con el título de Experimental Researches in Electricity (Investigaciones Experimentales en Electricidad), la primera de una serie monumental de 30 memorias que abarcó casi 25 años.

Antes de examinar más detenidamente la explicación de este fenómeno introduciremos, de manera elemental, el concepto de flujo del vector inducción magnética.

Flujo del vector inducción magnética

El concepto de flujo lo introdujo el matemático, astrónomo y físico alemán Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

En el caso particular de un campo magnético uniforme, el flujo del vector inducción magnética (Φ_B) a través de una superficie arbitraria cuya área tiene un valor A , es una magnitud física escalar definida por la relación:

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad 5.1$$

Donde θ es el ángulo que forma el vector inducción magnética ($\vec{B}$) con la dirección perpendicular a la superficie (representada por el vector ($\vec{N}$) de área A (figura 5.4).

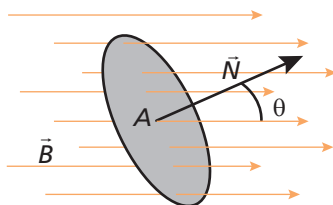


Fig. 5.4 Ilustración del concepto de flujo del vector inducción magnética

Definido de esta manera, el flujo del vector inducción magnética es el criterio cuantitativo que se utiliza para trazar las **líneas de inducción**.

En el SI la unidad de medida para el flujo magnético es el weber (Wb), en honor al físico alemán Wilhelm Eduard Weber (1804-1891). En correspondencia con la definición de flujo se tiene que:

$$1,0 \text{ Wb} = 1,0 \text{ T m}^2$$



De la historia

La representación del campo magnético de un imán o el de una corriente eléctrica en el espacio que les rodea mediante líneas de inducción fue ideada por Faraday y aplicada en la interpretación de la mayor parte de sus experimentos sobre electromagnetismo. Mediante este tipo de imágenes Faraday compensaba su falta de preparación matemática, apoyándose así en su enorme habilidad gráfica y su no inferior intuición científica. La noción de flujo magnético recoge esa tradición iniciada por Faraday de representar los campos mediante líneas de inducción, pero añade, además, un significado matemático.

Cuando se modela, con la ayuda de limaduras de hierro, el campo magnético inherente a un imán recto, se aprecia que, en los polos, las líneas de inducción están más próximas y que se separan al alejarse de ellos. Dado que la inducción magnética disminuye con la distancia a los polos, parece razonable relacionar ambos hechos y establecer por convenio una proporcionalidad directa entre el valor de la inducción magnética y la cantidad de líneas de inducción que atraviesan la superficie por unidad de área. Cuanto más apretadas están las líneas en una región, tanto mayor es el valor de la inducción magnética en dicha región.

Si las líneas de inducción son paralelas a la superficie A (figura 5.5) el flujo es nulo, ya que si $\theta = 90^\circ$ se tiene que $\cos 90^\circ = 0$.

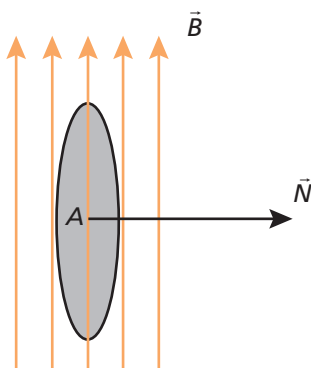


Fig. 5.5 En estas condiciones el flujo a través de la superficie de área A, es cero

El valor del flujo aumenta a medida que el ángulo θ decrece, alcanzando su máximo valor cuando la dirección del vector inducción es perpendicular a la superficie A (figura 5.6). En este caso el valor del flujo será:

$$\Phi_B = BA$$

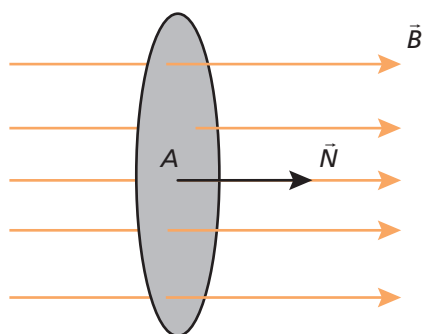


Fig. 5.6 Si la dirección del vector inducción magnética es perpendicular a la superficie el flujo alcanza el valor máximo posible

Es importante recordar que como no existen polos magnéticos aislados (monopolos), las **líneas de inducción del campo magnético son cerradas**. Por tanto, en una superficie cerrada en un campo magnético (a diferencia de las líneas fuerza del campo eléctrico), el flujo magnético que entra es igual al que sale ya que el mismo número de líneas que entra debe salir.

Problema resuelto 5.1

Calcula la variación del flujo magnético ($\Delta\Phi$) a través de un contorno que limita un área de $0,5 \text{ m}^2$, si esta gira en un campo magnético de inducción igual a $2,0 \cdot 10^4 \text{ T}$, desde $\alpha_1 = 0^\circ$ hasta $\alpha_2 = 45^\circ$ (α es el ángulo entre la normal al plano del contorno y la dirección de la línea de inducción del campo magnético).

Solución:

Hay que determinar la variación del flujo magnético, $\Phi_2 - \Phi_1$, al girar un contorno de superficie conocida en un campo magnético uniforme desde 0° hasta 45° .

La variación del flujo depende del flujo final (con $\alpha_2 = 45^\circ$) y del inicial (con $\alpha_1 = 0^\circ$)

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

El flujo a través de una superficie plana limitada por un contorno en un campo magnético uniforme, se puede calcular mediante la ecuación:

$$\Phi = BS\cos\alpha \quad (1)$$

Evaluando en esta ecuación para $\alpha_1 = 0^\circ$ y $\alpha_2 = 45^\circ$ se obtiene que:

$$\Phi_0 = BS\cos 0^\circ \text{ y } \Phi_{45} = BS\cos 45^\circ$$

Al sustituir estas expresiones en (1);

$$\Delta\Phi = BS(\cos 45^\circ - \cos 0^\circ)$$

$$\Delta\Phi = 2,0 \cdot 10^4 \text{ T} \cdot 0,5 \text{ m}^2 \left(\frac{2}{\sqrt{2}} - 1 \right)$$

$$\Delta\Phi = -0,29 \cdot 10^4 \text{ Wb}$$

El signo menos significa que el flujo magnético disminuye al girar el contorno de 0° hasta 45° .

Problema resuelto 5.2

La figura 5.7 muestra a un anillo circular que rota dentro de un campo magnético homogéneo de inducción $\vec{B}$ respecto al eje Z .

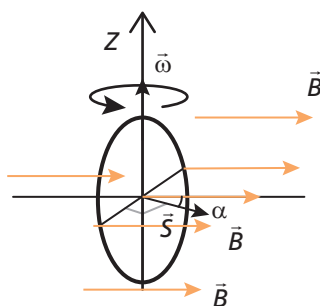


Fig. 5.7

Construye la gráfica del flujo de inducción magnética a través de una superficie plana colocada dentro de un campo magnético uniforme, en función del ángulo α formado por $\vec{B}$ y la normal a la superficie, $\Phi = f(\alpha)$, en el intervalo de $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$.

Solución:

El flujo de inducción magnética se puede determinar a partir de la ecuación 5.1:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1)$$

En el problema se pide construir la gráfica de $\Phi = f(\alpha)$

En este caso los módulos de B y S son constantes y la función de alfa tiene la forma que se ilustra en la figura 5.7 a. Nota que el flujo es máximo cuando el ángulo $\alpha = 0^\circ$ (figuras 5.7 y 5.7 a).

Como $\Phi = f(\alpha)$ tiene la forma descrita por la ecuación 1, basta multiplicar $\cos \alpha$ por BS para obtener el valor del flujo para cualquier

ángulo α , de manera que la gráfica requerida queda como ilustra la figura 5.7 a.

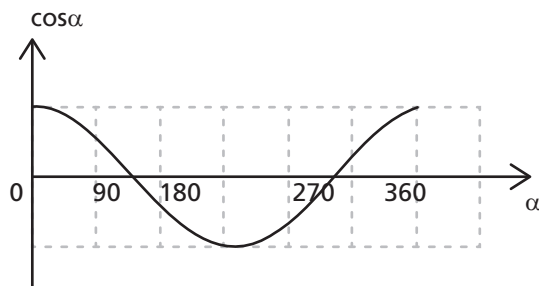


Fig. 5.7 a

Comprueba tus conocimientos

1. ¿En qué se diferencian el experimento de Oersted y el de Faraday sobre el fenómeno de la inducción electromagnética?
2. ¿A qué llamamos flujo magnético? Explica su significado.
3. En cuál de los casos representados en la figura 5.8 el flujo magnético es cero, y en cuál es máximo. ¿Por qué?

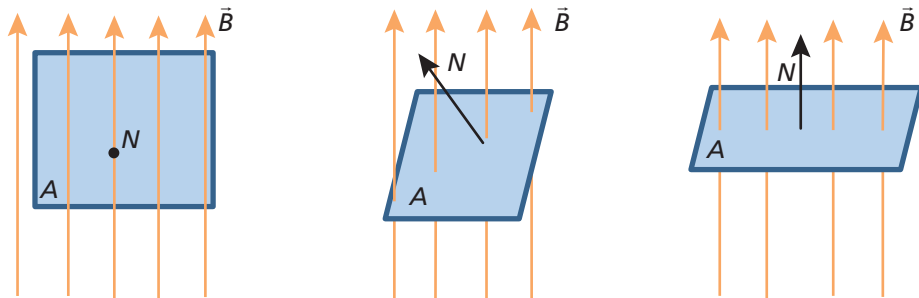


Fig. 5.8

5.2 Ley de Faraday de la inducción electromagnética. Tensión de inducción o fuerza electromotriz de inducción

Continuemos ahora analizando el fenómeno de la inducción electromagnética.

Una versión contemporánea y muy simplificada del trabajo realizado por Faraday, que condujo a la formulación de la ley de la inducción electromagnética, se puede resumir en los experimentos siguientes:

Experimento 1

De hecho, este es el experimento mencionado al inicio de esta sección. En el arreglo experimental que se muestra en la figura 5.9, la bobina 1 se conecta en serie con el galvanómetro y la bobina 2 se conecta en serie con una fuente de corriente directa y un interruptor. La barra de láminas de hierro que pasa por el centro de las bobinas solo tiene el objetivo de amplificar el efecto que se observa, cosa que fue notada por el propio Faraday en sus experimentos originales.

Al manipular el interruptor se aprecia que el galvanómetro conectado a la bobina 1 registra el paso de corriente eléctrica en los momentos de conexión (figura 5.9 a) y desconexión (figura 5.9 c) del circuito 2, pero no se detecta corriente cuando el interruptor permanece cerrado (figura 5.9 b).

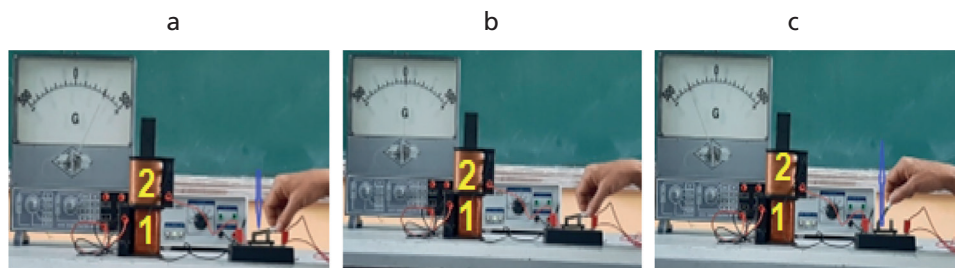


Fig. 5.9 El galvanómetro conectado a la bobina 1 detecta el paso de corriente cuando la bobina 2 se conecta o desconecta de la corriente. Nota cómo cambia el sentido de la corriente cuando se abre o cierra el interruptor

A la corriente que circula por la bobina en estas condiciones se le denomina **corriente inducida** y al fenómeno de su producción **fenómeno de inducción electromagnética**.

Experimento 2

Se arma un circuito constituido por una bobina conectada en serie con un galvanómetro como se muestra en la figura 5.10 (debe notarse que en este circuito no se ha conectado ninguna fuente de corriente).

Si se coloca uno de los polos de un imán próximo a la sección transversal de la bobina y lo mantenemos fijo, el galvanómetro no indica corriente alguna, aunque la bobina está sometida a la influencia del campo magnético del imán (figura 5.10 a).

Si el imán se sustituye por otro cuyo campo magnético sea mucho más intenso y se incrementa la sensibilidad del galvanómetro, este tampoco

indicará corriente siempre que se mantenga el reposo relativo entre el imán y la bobina.

Sin embargo, si el imán se aproxima a la bobina o se aleja de ella, el galvanómetro indica la circulación de corriente, la cual solo se detecta durante el tiempo en que el imán se acerca o aleja de la bobina (figuras 5.10 b y 5.10 c).

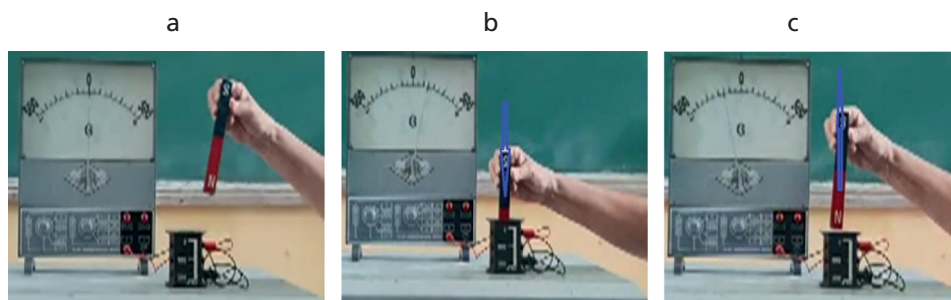


Fig. 5.10 a) Cuando el imán está fijo el galvanómetro no indica corriente por la bobina; Cuando el imán se acerca (b) o aleja (c) el galvanómetro registra que por la bobina circula corriente

Experimento 3

Si el imán del experimento 2 se sustituye por una bobina por la que circula corriente, vale decir, por un electroimán, se obtienen los mismos resultados que cuando se utiliza el imán (figura 5.11).

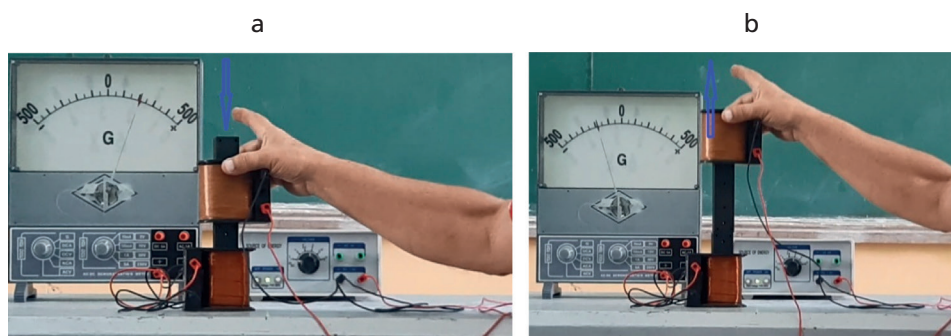


Fig. 5.11 Mientras la bobina con corriente se mueve acercándose (a) o alejándose (b) de la que está conectada al galvanómetro, el instrumento indica el paso de la corriente por ese circuito

En el caso de los experimentos 2 y 3, el mecanismo del surgimiento de la corriente inducida se puede explicar a partir de la fuerza de Lorentz que actúa sobre los electrones libres en un conductor en movimiento.

Analicemos esto de manera sencilla: sea un conductor que se mueve con velocidad $\vec{v}$ en dirección perpendicular al vector de inducción $\vec{B}$ (figura 5.12 a). En esta situación sobre las cargas libres en el conductor (convencionalmente positivas, aunque, como sabemos, las cargas libres en el conductor son los electrones), actúa la componente magnética de la fuerza de Lorentz, de manera que se produce una división de las cargas acumulándose las negativas en un extremo y quedando positivo el otro. Esta acumulación de cargas da lugar al surgimiento de un campo eléctrico coulombiano en el interior del conductor, que aumenta hasta que se alcanza el equilibrio entre la fuerza eléctrica coulombiana y la fuerza magnética que actúa sobre las cargas libres. Si se conectan los extremos del conductor (figura 5.12 b), por el circuito formado circulará la corriente eléctrica como consecuencia de la tensión inducida (para la que también se utiliza el nombre de fuerza electromotriz inducida) en el conductor móvil.

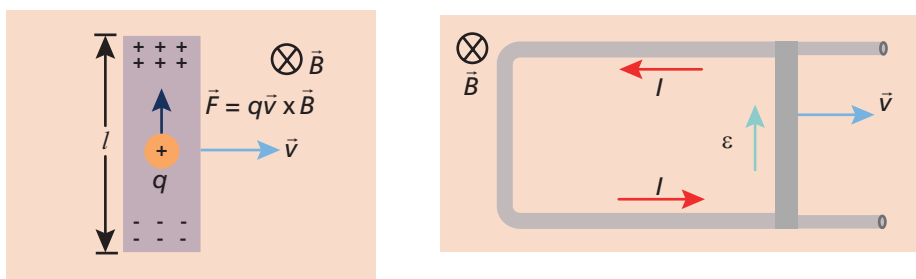


Fig. 5.12 a) El movimiento de los portadores de carga en el conductor se mantiene hasta que el campo eléctrico ejerce una fuerza eléctrica sobre estos portadores igual a la componente magnética de la fuerza de Lorentz; b) Si los extremos del conductor están conectados, formando un circuito cerrado, por el conductor se establecerá una corriente eléctrica inducida

Es importante notar que en este caso el efecto de la fuerza de Lorentz es análogo al de un campo eléctrico no coulombiano (al que llamaremos campo externo), dirigido en sentido contrario al campo coulombiano que se genera en el interior del conductor. Cuando el circuito está cerrado, como muestra la experiencia, el campo coulombiano es menor que el externo y por el circuito circula corriente.

Ahora bien, cuando la bobina está inmóvil y lo que se mueve con velocidad constante es el imán, también se detecta la corriente inducida, aunque, en esta situación, sobre los portadores de carga libres en el conductor no actúa ninguna fuerza magnética.

¿Cómo se explica en esta situación la generación de la corriente inducida?

Como sabemos, el movimiento ordenado de los portadores de carga libre en un conductor puede estar originado por una fuerza magnética o por fuerzas eléctricas. En el caso en que el conductor permanece inmóvil respecto al sistema de referencia ligado al “laboratorio” y el imán es el que se mueve, con velocidad constante, la corriente inducida estará ocasionada por la componente eléctrica de la fuerza de Lorentz. Esto está en correspondencia, como estudiaremos más adelante, con el principio de la relatividad formulado por Einstein, vale decir, que las leyes de la Física son iguales en todos los sistemas de referencia inerciales.

En resumen, cuando el conductor se mueve respecto al sistema fijo ligado al imán (o electroimán) la corriente inducida se debe a la componente magnética de la fuerza de Lorentz y cuando la fuente del campo magnético es la que se mueve respecto al sistema de referencia ligado al conductor, es la componente eléctrica de la fuerza de Lorentz la que da lugar a la corriente inducida. De esto se infiere un hecho esencial:

Los campos eléctricos y magnéticos no existen de manera independiente y el que en determinadas condiciones encontremos que actúa una fuerza magnética o eléctrica, depende del sistema de referencia, pero la fuerza de Lorentz permanece invariante.

Tenemos entonces que, cuando se mueve el imán respecto al conductor, en la región donde está el conductor, se establece un campo eléctrico que no existe en el sistema de referencia ligado al imán, con las particularidades siguientes:

- 1) No es un campo electrostático (coulombiano), pues esta originado por el acercamiento (o alejamiento) del imán respecto al conductor y no por una determinada distribución de cargas.
- 2) Las líneas de fuerza de este campo son cerradas, es decir, no comienza en las cargas positivas y terminan en las negativas. Por esto, a este campo se le denomina **campo eléctrico rotacional**.
- 3) Este campo no es conservativo pues al moverse las cargas por un circuito cerrado el trabajo sobre ellas es diferente de cero, de manera que la característica energética de este campo no es la diferencia de potencial (o tensión) electrostática, **sino la diferencia de potencial o tensión inducida** (la también llamada **fuerza electromotriz de inducción**)

En el caso del experimento 1, en el que tanto el conductor como la fuente del campo están en reposo respecto a un determinado sistema de referencia (por ejemplo, el del laboratorio), la corriente inducida en la bobina conectada al galvanómetro se puede explicar a partir de la generación de un campo eléctrico rotacional. De esta manera se puede llegar a la conclusión de que cualquier variación del campo magnético, o más propiamente dicho, del flujo de la inducción magnética a través del área limitada por el contorno del conductor, da lugar a la generación de un campo eléctrico rotacional. Esta interpretación, debida a Maxwell, puede aplicarse incluso al caso del conductor móvil en presencia de un campo magnético. Más adelante examinaremos este caso particular de forma más detallada.

Faraday también encontró que la intensidad de la corriente inducida depende de la rapidez con que varía el flujo del vector inducción magnética. En resumen, los experimentos realizados por Faraday indican que:

Si a través de la superficie limitada por un conductor cerrado se produce una variación del flujo del vector inducción magnética, por el conductor circulará una corriente eléctrica cuyo valor es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo.

Por otra parte, para que por un conductor circule corriente es preciso establecer una diferencia de potencial o tensión entre sus extremos, lo que sucede es que la variación de flujo del vector inducción magnética a través del área limitada por el conductor da lugar a una **diferencia de potencial** o **tensión inducida**, cuyo valor es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético. Comúnmente esta magnitud se denota por el símbolo ε_i .

Se tiene entonces que:

$$\varepsilon_i = -k \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \quad 5.2$$

Donde k es la constante de proporcionalidad. En el Sistema Internacional de Unidades $k = 1$ y la ecuación queda en la forma:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \quad 5.3$$

Donde Φ_B se mide en weber, t en segundos (s) y ε_i en volt (V).

Siendo esta la forma matemática en que se formula la Ley de Faraday de la Inducción Electromagnética.

Puede ser conveniente reiterar que a la tensión inducida aún se le acostumbra a llamar *fuerza electromotriz inducida*, aunque como sabemos, la fuerza electromotriz *no es propiamente una fuerza*.

El signo menos en la ecuación está relacionado con el hecho de considerar positiva a la tensión inducida cuando el flujo disminuye y viceversa.

El cambio del sentido de la corriente inducida, observado en los experimentos, es consecuencia del cambio del sentido de la tensión inducida. Si el polo norte del imán se aproxima a la espira conductora, el sentido de la corriente inducida es tal que su campo se opone al aumento del flujo inducido por el campo magnético del imán, es decir, lo debilita, y en la cara de la superficie de la espira que está orientada hacia el imán aparece un polo norte que se opone al acercamiento de este (figura 5.14 a); esto fue estudiado por el físico Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), quien en 1834 formuló una regla general a partir del hecho de que el sentido de la corriente inducida siempre es tal que se opone al aumento o disminución del flujo a través del área limitada por el contorno del circuito; si fuera lo opuesto, se estaría en presencia de un fenómeno que violaría la ley de conservación de la energía.

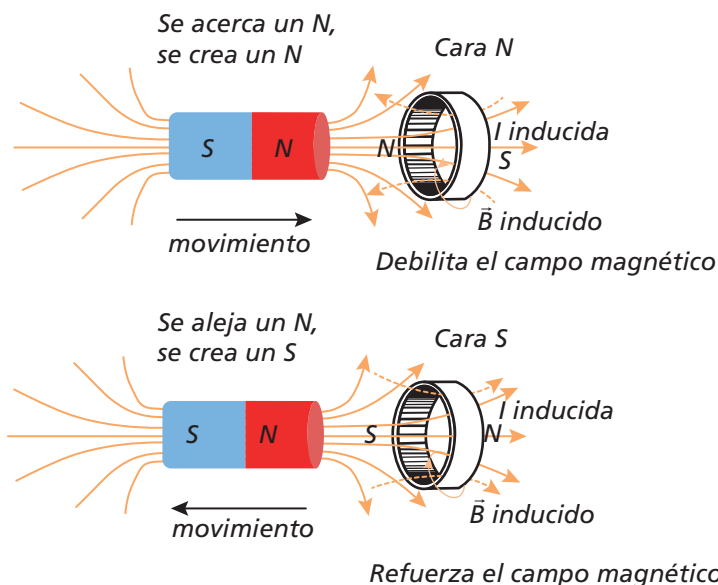


Fig. 5.14 a) Cuando el polo norte del imán se aproxima a la espira conductora el campo de la corriente inducida se opone al aumento del flujo (surge un polo norte que se opone al acercamiento del imán); b) al alejar el imán, la espira es atraída (surge un polo sur) y el sistema gira en el sentido indicado



De la historia

El físico Friedrich Lenz (figura 5.13) era de nacionalidad alemana. Nació en Dorpat (actualmente Tartu, Estonia) en 1804, que en ese momento formaba parte del Imperio ruso, pero se trasladó a Alemania para estudiar y trabajar en su carrera científica. Lenz es conocido por sus contribuciones al electromagnetismo, especialmente en lo que hoy se conoce como la Ley de Lenz, que establece la dirección de las corrientes inducidas por la variación del campo magnético en un circuito cerrado.



Fig. 5.13

En síntesis, la regla de Lenz dice lo siguiente: La corriente inducida siempre tiene un sentido tal, que su campo magnético se opone a la variación del flujo de la inducción magnética que provoca la inducción de la corriente.

Por su importancia y trascendencia puede ser conveniente intentar insistir de manera resumida en las ideas siguientes:

- Lo esencial en el fenómeno de la inducción electromagnética no es la generación de la corriente inducida sino de la tensión inducida: la corriente inducida aparece como consecuencia de la tensión inducida si el circuito (espira, bobina, etc.) está cerrado.
- Cuando la tensión inducida es una consecuencia de la variación del flujo de la inducción magnética, su origen está en el campo eléctrico rotacional que se induce, existan o no conductores en esa región, de hecho, este fue el descubrimiento clave de Faraday, que posteriormente Maxwell formalizó de forma matemática.

Si bien la regla del flujo se cumple en todos los casos estudiados (hay algunas excepciones) es importante tener en cuenta que el origen de la tensión inducida en un conductor que se mueve en presencia de un campo magnético estacionario se debe al efecto de la componente magnética de la fuerza Lorentz.

De hecho, en todos los casos, la idea básica es la de que el origen de la tensión inducida está en la fuerza de Lorentz, en algunos casos debido a su componente magnético y en otros a su componente eléctrico como consecuencia del campo eléctrico rotacional que se induce.



Saber más

En la famosas Conferencias sobre Física del físico estadounidense Richard Feynman (The Feynman Lectures on Physics) se ejemplifica un caso en el que no se puede aplicar la regla del flujo. En palabras de Feynman:

“Imaginen dos placas metálicas con bordes ligeramente curvados, como se muestra en la figura 5.15, colocadas en un campo magnético uniforme perpendicular a sus superficies. Cada placa está conectada a uno de los terminales de un galvanómetro y hacen contacto en un punto P, así que hay un circuito completo. Si ahora las placas se mecen en un ángulo pequeño, el punto de contacto se moverá hacia el punto P'. Si imaginamos que el circuito se completa a través de las placas por la línea punteada mostrada en la figura, el flujo magnético varía en una gran cantidad a medida que las placas se mecen. No obstante, el balanceo se puede hacer con ángulos pequeños de modo que $\vec{v} \times \vec{B}$ sea muy pequeño y no haya prácticamente *fem*. La regla del flujo no se aplica en este caso. Debe ser aplicada a circuitos en los cuales el material del circuito no se altera. Cuando el material del circuito está cambiando debemos retornar a las leyes básicas”

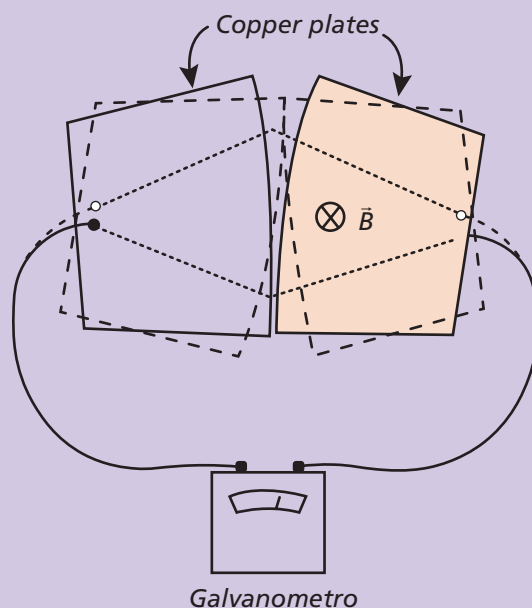


Fig. 5.15

Tensión de inducción en los conductores en movimiento

Examinemos ahora, con más detalle, el cálculo de la determinación de la tensión inducida en el caso de los conductores en movimiento en un campo magnético estacionario.

Analicemos ahora con más detenimiento el caso particular de la tensión que se induce cuando un conductor se desplaza en el interior de un campo magnético uniforme y estacionario, con velocidad constante y dirección perpendicular a las líneas de inducción (figura 5.16)

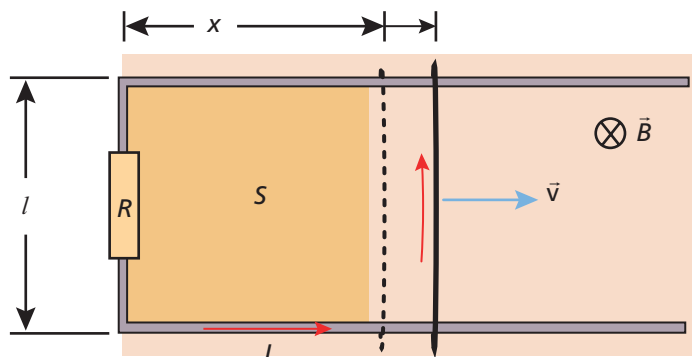


Fig. 5.16 Conductor móvil en un campo magnético uniforme estacionario

Como conocemos, en este caso la tensión inducida en el conductor se puede explicar a partir de la fuerza que el campo magnético ejerce sobre los portadores de carga eléctrica del conductor en movimiento.

En estas condiciones la fuerza magnética provoca una separación de las partículas cargadas en el conductor de forma tal que un extremo del conductor existirá un déficit de electrones y en el otro extremo un exceso de este tipo de portador (figura 5.17) y en consecuencia, una diferencia de potencial que puede mantener la circulación de corriente por el circuito cerrado mediante los rieles conductores que forman los conductores para mantener una corriente eléctrica inducida en el conductor móvil.

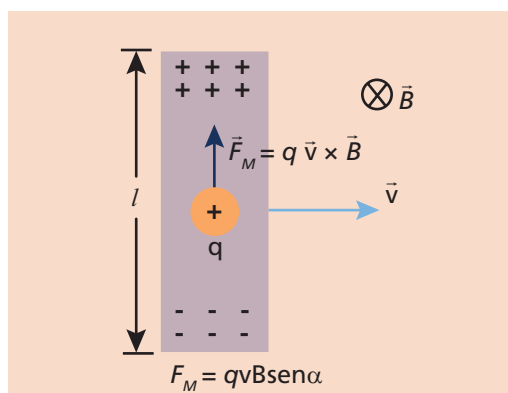


Fig. 5.17 Modelo para explicar la tensión inducida en un conductor móvil

Para calcular el valor de la tensión inducida o fuerza electromotriz de inducción se puede proceder de la manera siguiente:

En la figura 5.18 se muestra la situación del conductor de longitud l que se mueve con velocidad de valor v perpendicular a un campo magnético homogéneo de inducción $\vec{B}$, figura 5.18 a. Sobre el conductor actuará la fuerza de Ampere $\vec{F}_A$, que es la resultante de la fuerza de Lorentz $\vec{F}_L$ que actúa sobre cada partícula positiva que se mueve con velocidad $\vec{V}$ (de acuerdo con la ecuación de composición de velocidades el conductor se desplaza con una velocidad resultante) $\vec{V} = \vec{v} + \vec{u}$, donde $\vec{u}$ es la velocidad de la partícula respecto al conductor (figura 5.18 a). Como se ilustra en la figura 5.16 b, la fuerza de Lorentz tiene dos componentes, una en la dirección del alambre $\vec{F}_{elc}$ y otra en la dirección perpendicular, la fuerza de Ampere.

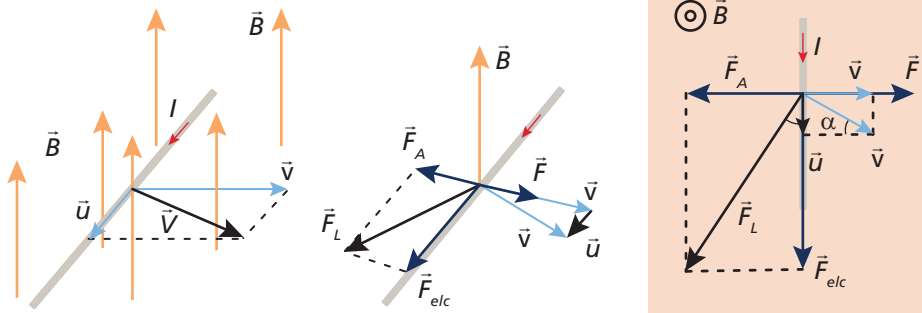


Fig. 5.18

El trabajo de la fuerza de Lorentz es cero, pues $\vec{V}$ es perpendicular a $\vec{F}_L$, de esta manera el trabajo de la fuerza resultante es igual a cero ($W_{F_A} + W_{F_{elc}} = 0$) quedando $W_{F_A} = -W_{F_{elc}}$.

Según la figura 5.18 c, $W_{F_A} = -W_F$

Al sustituir W_{F_A} , obtenemos que $W_{F_{elc}} = -W_{F_{externa}}$

De acuerdo con la figura 5.18 c, la $W_{elc} = F_L \cos \alpha$, de esta manera podemos plantear que, $W_{F_{elc}} = (F_L \cos \alpha)l$, teniendo en cuenta que $F_L = qVB$, obtenemos $W_{F_{elc}} = (qVB \cos \alpha)l$, como $V \cos \alpha = v$, combinando ambas ecuaciones obtenemos que $W_{F_{elc}} = qvBl$. Como $\varepsilon = \frac{W_{F_{elc}}}{q}$, queda entonces que:

$$\varepsilon = vBl \quad 5.4$$

Para el caso de que el conductor se mueva formando un cierto ángulo θ con la dirección de las líneas de inducción, se puede demostrar que la tensión de inducción estará dada por la ecuación:

$$\varepsilon = vBl \sin \theta \quad 5.5$$

Como es de esperar, este resultado coincidirá con el que se calcule a partir de la rapidez con que cambie el flujo de la inducción magnética a través del área S (figura 5.18). Demostremoslo:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Donde $\Delta\Phi_B = -B\Delta S$

Pero como $\Delta S = l\Delta x = lv\Delta t$

Se tendrá entonces que:

$$\varepsilon_i = Blv$$

Problema resuelto 5.3

1. En la figura 5.17 se muestran dos casos del fenómeno de inducción electromagnética. Analízalos y determina:
 - a) El sentido de la corriente inducida en el anillo conductor de la figura 5.19 a, si el imán se mueve tal como se indica.
 - b) ¿Cómo se mueve el imán si la corriente inducida en el anillo (figura 5.19 b) tiene el sentido indicado?

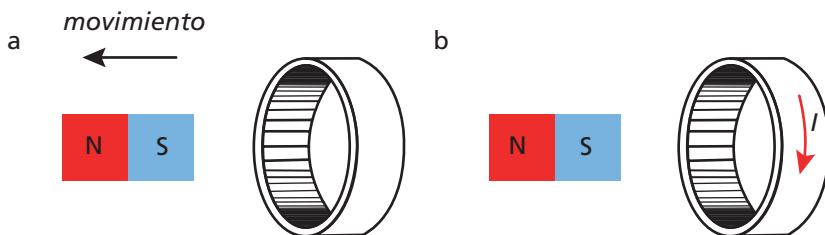


Fig. 5.19

Solución:

- a) Nos encontramos ante dos casos del fenómeno de la inducción electromagnética. Primero analizaremos el que se muestra en la figura 5.19 a, que corresponde a la inducción de una corriente en un anillo fijo, cuando un imán que se encontraba frente a él se aleja. Como consecuencia de este alejamiento, la inducción del campo magnético disminuirá, lo cual provocará la aparición de una corriente inducida. Es precisamente el sentido de esta corriente la que debemos determinar.

Este tipo de problema, en el que se conoce la causa que provoca el fenómeno de inducción, se denomina problema directo, y para

resolverlo puede resultar útil el considerar la siguiente línea de razonamiento:

1. Analizar cada uno de los componentes del sistema, diferenciando el agente inductor y el inducido.
2. Representar el campo del inductor y precisar sus características (qué le sucede o la causa que provoca el fenómeno de la inducción).
3. Determinar el tipo de oposición que debe ofrecer el inducido. Hacer las representaciones esquemáticas de las cantidades correspondientes.
4. Aplicar la regla de la mano derecha para determinar la dirección de la magnitud desconocida (incógnita). Hacer la representación necesaria.

Veamos cómo se procede en nuestro caso:

1. El imán es el agente inductor y el anillo, el inducido.
2. En la figura 5.20 a se muestra el espectro magnético del inductor (imán). La causa del fenómeno de la inducción, en este caso, es la disminución de la inducción del campo a través del anillo, lo cual es determinado por el alejamiento del imán.

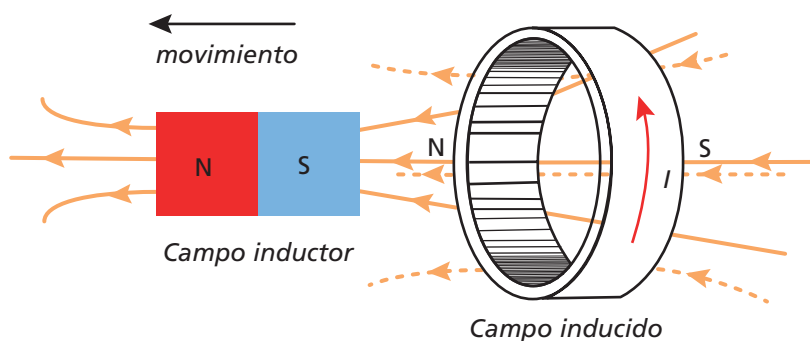


Fig. 5.20 a

3. Para oponerse a la disminución de la inducción del campo magnético del imán, en el anillo debe aparecer una corriente inducida de sentido tal que provoque un campo magnético de igual dirección que el del imán, para sumársele (representado con líneas discontinuas). Podemos decir también que, en la cara del anillo próxima al imán, debe aparecer una polaridad magnética contraria (norte), para oponerse al alejamiento. Ambos razonamientos son válidos y deben corresponderse. En la figura a se muestra que en la cara 1 del anillo surge una polaridad norte, y como las líneas de inducción del anillo salen por esta zona, ellas tienen igual dirección que la del campo del inductor (imán).

4. Conociendo el sentido de las líneas de inducción del campo de la corriente inducida, apliquemos la regla de la mano derecha. Esta nos indica que la dirección de la corriente inducida es la señalada en la figura 5.20 a, la cual es la respuesta buscada.

a) El caso representado en la figura 5.20 b corresponde a un problema de tipo inverso del fenómeno de inducción electromagnética. En esta ocasión nos dan el resultado del fenómeno, es decir, el sentido de la corriente inducida en el anillo (inducido), y se nos pide que determinemos qué le ocurre al inductor (causa del fenómeno).

Para resolver los problemas de este tipo puede ser conveniente seguir la siguiente línea de razonamiento:

1. Analizar cada uno de los componentes del sistema diferenciando el inductor y el inducido.
2. Precisar qué ocurre en el inductor y en el inducido. Hacer la representación de las cantidades que se ofrecen como datos y que se muestran en el esquema, tanto en forma explícita como implícita.
3. Aplicar la regla de la mano derecha para determinar el efecto que produce la corriente inducida. Hacer las representaciones necesarias.
4. Determinar la causa del fenómeno de inducción sobre la base de la oposición que produce el efecto de la corriente inducida. Hacer la representación de la cantidad o incógnita solicitada.

Veamos cómo proceder en el caso de la figura 5.20 b.

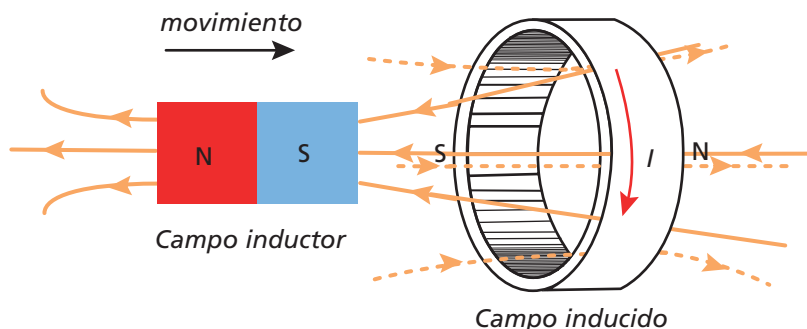


Fig. 5.20 b

1. El anillo es el inducido que está en reposo; por lo tanto, el imán es el inductor.
2. Por el inducido circula una corriente cuyo sentido se conoce. Esta corriente es inducida por el movimiento del imán (la forma en que lo

Problema resuelto 5.5

¿Cuál será el valor de la *fem* de inducción producida en una espira si al cabo de 0,1 s, el flujo magnético varía en ella en 0,05 Wb?

Solución:

En el problema hay que determinar la *fem* inducida en un contorno, conocida la variación del flujo magnético, $\Delta\Phi$ y el intervalo de tiempo Δt en que varía el flujo magnético.

La *fem* inducida en el contorno es directamente proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Evaluando la expresión anterior para $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ y $\Delta\Phi = 0,05 \text{ Wb}$, se obtiene que el valor de la *fem* inducida es:

$$\varepsilon_i = -\frac{0,05 \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}}$$

$$\varepsilon_i = -0,5 \text{ V}$$

Problema resuelto 5.6

Una bobina tiene 1 500 espiras. Por su sección transversal pasa un flujo magnético que disminuye 0,25 Wb cada 5,0 s. Determina la *fem* de inducción (*femi*) que se genera en la bobina.

Solución:

Hay que determinar la *fem* inducida que se genera en una bobina de N espiras sometido a un flujo magnético Φ , cuya variación $\Delta\Phi = 0,25 \text{ Wb}$ ocurre en $\Delta t = 5,0 \text{ s}$

La *femi* inducida en la bobina es proporcional a la variación de flujo en la unidad de tiempo y el número de espiras de la bobina:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Sustituyendo en la expresión anterior los datos proporcionados por el problema, podemos calcular el valor de la *fem* inducida:

$$\varepsilon_i = -1500 \frac{-0,25 \text{ Wb}}{5,0 \text{ s}}$$

$$\varepsilon_i = 75 \text{ V}$$

Problema resuelto 5.7

Una bobina de N espiras, de área S , está conectada a un galvanómetro (este instrumento mide la carga eléctrica que pasa por él). La resistencia de todo el circuito es R . Al principio, la bobina se encontraba entre los polos de un imán en la región en que el campo magnético es homogéneo y la inducción del campo $\vec{B}$ es perpendicular a las espiras de la bobina. Después se desplazó la bobina hacia la región del espacio donde el campo magnético es nulo. Determina la carga que pasó por el galvanómetro.

Solución:

Como:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

$$\varepsilon_i = I_i R \quad \text{donde} \quad I_i = \frac{q}{\Delta t}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Phi - \Phi_0}{\Delta t} = I_i R$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Phi_0}{\Delta t} = \frac{q}{\Delta t} \cdot R$$

$$\frac{\Phi_0}{R} = q$$

$$q = \frac{BSN}{R}$$

Problema resuelto 5.8

Una espira circular de 0,2 m de radio se sitúa en un campo magnético uniforme de 0,2 T con su eje paralelo a la dirección de este, como muestra la figura 5.23.

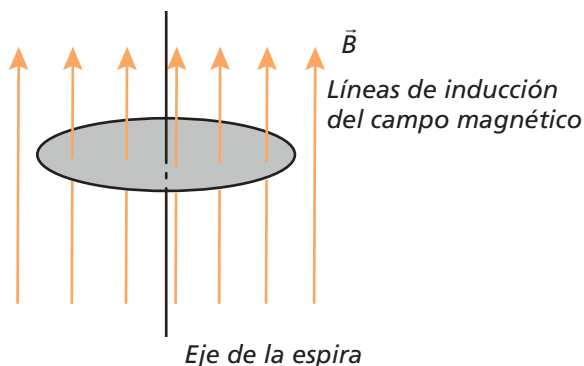


Fig. 5.23

Determina la *fem* inducida en dicha espira si gira en 0,1 s y de manera uniforme:

- a) se duplica el valor del campo,
- b) se reduce el valor del campo a cero,
- c) se invierte el sentido del campo,
- d) se gira la espira un ángulo de 90° en torno a un eje diametral perpendicular a la dirección del campo magnético.

Solución:

En todos los casos propuestos, a través del área limitada por la espira se produce una variación del flujo del vector inducción magnética que genera una *fem* inducida en la espira. En correspondencia con la ley de Faraday, el valor de la *fem* inducida estará dado por:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Donde se ha tomado en cuenta que $N = 1,0$

- a) Al duplicarse el valor del campo magnético se tiene que:

$$\Delta \Phi_B = \Phi_{Bf} - \Phi_{Bi}$$

$$\Phi_{Bf} = B_f A \cos \theta = 2(0,2 \text{ T}) \cdot \pi(0,2 \text{ m})^2 (1) = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{Bi} = B_i A \cos \theta = (0,2 \text{ T}) \cdot \pi(0,2 \text{ m})^2 (1) = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\Delta \Phi_B = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} - 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = - \frac{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = -0,25 \text{ V}$$

- b) En este caso el flujo inicial sigue siendo el mismo e igual a $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$ y el flujo final toma el valor de 0 Wb, por lo que:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = - \frac{-2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 0,25 \text{ V}$$

- c) Al invertirse el sentido del campo magnético original el flujo inicial y el final tendrán el mismo valor, pero con signos contrarios ya que el flujo final será negativo tomando en consideración que ahora formará un ángulo de 180° con la dirección perpendicular a la superficie, por tanto:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = - \frac{-2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} - 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 0,50 \text{ V}$$

- d) Si la espira gira ahora un ángulo de 90° , de tal manera que el vector de campo magnético $\vec{B}$ forme un ángulo de 90° respecto al vector de

superficie A , entonces el flujo inicial seguirá siendo el mismo, pero el flujo final será cero ya que el coseno de 90° es cero, por lo tanto:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -\frac{0 \text{ Wb} - 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 0,25 \text{ V}$$

Problema resuelto 5.9

Una bobina de 100 espiras, que tiene un área transversal de $0,05 \text{ m}^2$, está en presencia de un campo magnético perpendicular al plano de la bobina que varía linealmente desde 0 a $0,4 \text{ T}$ en $0,5 \text{ s}$. ¿Cuál es la *fem* inducida en la bobina?

Solución:

En correspondencia con la ley de Faraday, la *fem* inducida en la espira estará dada por:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Por otra parte, para la variación del flujo se tiene en este caso que.

$$\Delta\Phi_B = \Phi_{Bf} - \Phi_{Bi}$$

$$\Phi_{Bf} = B_f A \cos\theta = (0,4 \text{ T})(0,05 \text{ m}^2)(1) = 0,02 \text{ Wb}$$

$$\Phi_{Bi} = B_i A \cos\theta = (0 \text{ T})(0,05 \text{ m}^2)(1) = 0 \text{ Wb}$$

$$\Delta\Phi_B = 0,02 \text{ Wb} - 0 \text{ Wb} = 0,02 \text{ Wb}$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -100 \frac{0,02 \text{ Wb}}{0,5 \text{ s}} = -4,0 \text{ V}$$

Problema resuelto 5.10

La varilla MN se mueve con una velocidad constante de valor $v = 2,0 \text{ m/s}$ en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme de valor $0,4 \text{ T}$ como se muestra en la figura 5.24.

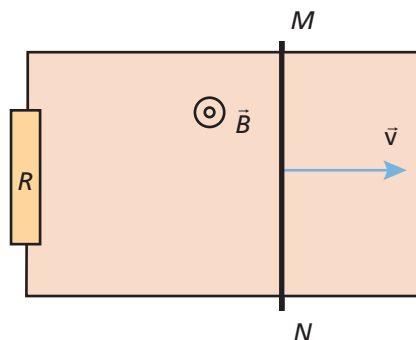


Fig. 5.24

Si el valor de la resistencia es de $60\ \Omega$ y la longitud de la varilla de $1,2\text{ m}$ determina la *fem* inducida y la intensidad de la corriente que circula por el circuito.

Solución:

En este caso, el valor de la *fem* inducida puede calcularse directamente a partir de la expresión:

$$\varepsilon_i = B l v \sin\theta$$

Sustituyendo por lo valores numéricos:

$$\varepsilon_i = (0,4\text{ T})(1,2\text{ m})(2,0\text{ m/s})(1,0) = 0,96\text{ V}$$

El valor de la intensidad de la corriente se puede calcular a partir de la ley de Ohm:

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

$$I = \frac{0,96\text{ V}}{60\ \Omega} = 16\text{ mA}$$

¿Sabías que...?

Algunas reflexiones sobre la naturaleza del conocimiento científico y el descubrimiento de la inducción electromagnética

Puede resultar útil aprovechar el estudio del importante fenómeno de la inducción electromagnética para retomar algunas reflexiones sobre la naturaleza del conocimiento científico.

Debe notarse que Faraday pudo realizar sus descubrimientos porque tenía a su disposición la batería o pila voltaica, inventada por Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745–1827), físico italiano, no muchos años antes, y el galvanómetro, inventado por Ampère hacía poco tiempo. Sin estos aparatos no hubiera podido hacer ningún descubrimiento. En segundo lugar, Faraday pudo plantearse la pregunta acerca del efecto del magnetismo sobre la electricidad después de que entendió los descubrimientos de Oersted y Ampère. Si no hubiera conocido esto, ni Faraday ni ninguna otra persona hubiese podido plantear dicha cuestión. Estos aspectos son muy importantes, pues el avance de los conocimientos ocurre como la construcción de un edificio: se construye el segundo piso después de haber construido el primero y así sucesivamente. Se va avanzando en el conocimiento de la naturaleza basándose en descubrimientos e invenciones hechos con anterioridad. Por ello, Isaac Newton una vez expresó: "Pude ver más lejos que otros porque estaba encima de los hombros de gigantes."

También vale mencionar que, como ha ocurrido en otros capítulos de la ciencia, el hecho de que el fenómeno de la inducción electromagnética también estaba siendo estudiado, de forma independiente, en la misma época por el físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878), pero Faraday recibió el crédito del descubrimiento porque sus experimentos fueron más detallados y sus resultados se publicaron primero. No obstante, Henry descubrió la inductancia de una bobina y construyó un electroimán tan potente que era capaz de levantar cuerpos de miles de libras. Fue el físico más eminente de los Estados Unidos en el siglo xix. En su honor se le dio su nombre a la unidad de inductancia, el henrio, 12 años después de su muerte.

Hora del laboratorio

Estudio del fenómeno de la inducción electromagnética.

Objetivo:

Confirmar la obtención de corriente a partir de un campo magnético variable en el tiempo

Instrumentos y materiales:

2 imanes rectos, bobina de 500 espiras, bobina de 1 000 espiras, fuente de corriente directa, interruptor, instrumento de medición, 5 cables de conexión, 5 tableros receptáculos de dispositivos eléctricos intercambiables, núcleo en I, aguja magnética con su soporte.

Indicaciones para el trabajo:

- Monta un circuito como el representado en la figura 5.25. El instrumento de medición debe de estar preparado para trabajar según su mínimo rango de medición. Utiliza la bobina de 500 espiras.

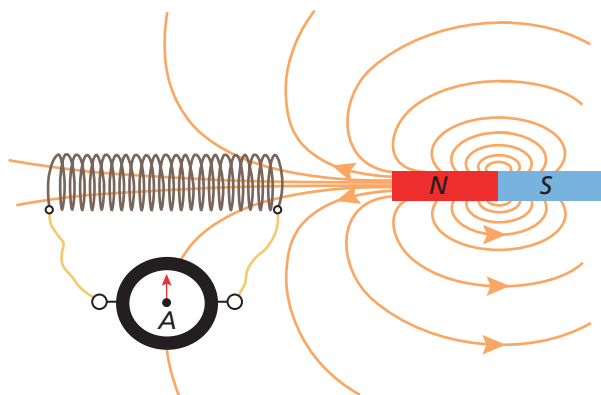


Fig. 5.25

- b. Determina previamente la polaridad del instrumento de forma que se pueda decidir en qué sentido circula la corriente por el aparato cuando la aguja se desplaza hacia la izquierda o hacia la derecha.
- c. Toma un imán de barra. Determina e identifica sus polos magnéticos.
- d. Acerca el polo norte del imán a una de las caras de la bobina. Observa las indicaciones del instrumento de medición. Haz un esquema representativo del acercamiento del imán a la bobina. Aplica la ley de Lenz y determina el sentido de la corriente en tu esquema. Comprueba si el resultado experimental está de acuerdo con el análisis que se basa en el esquema del fenómeno observado.
- e. Monta un segundo circuito como el representado en la figura 5.26. El núcleo de forma de I debe quedar colocado entre las bobinas y el instrumento de medición conectado a la bobina de 1 000 espiras.

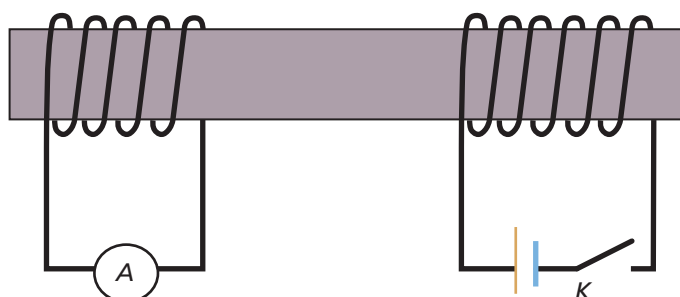


Fig. 5.26

- g. Representa en la libreta el circuito montado. Ten cuidado de representar correctamente la forma y el sentido en que están enrolladas las espiras de las bobinas.
- h. A partir de la ley de Lenz y del esquema, determina el sentido de la corriente que se induce en la bobina de 1 000 espiras al cerrar el interruptor k.

Comprueba tus conocimientos

4. En esta sección se ha presentado una versión resumida de los experimentos de Faraday relacionados con la inducción electromagnética; descríbelos.
5. Discute e ilustra la siguiente afirmación: "La corriente eléctrica surge en un conductor en reposo dentro de un campo magnético variable con el tiempo o en un conductor que se mueva dentro de un campo magnético estacionario, de tal modo que siempre varíe el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el circuito".

6. Explica por qué en los circuitos representados en la figura 5.27 aparece corriente inducida en una de las espiras cuando se cierra o se abre el circuito eléctrico de la otra bobina en reposo con respecto a la primera. Compruébalo experimentalmente.

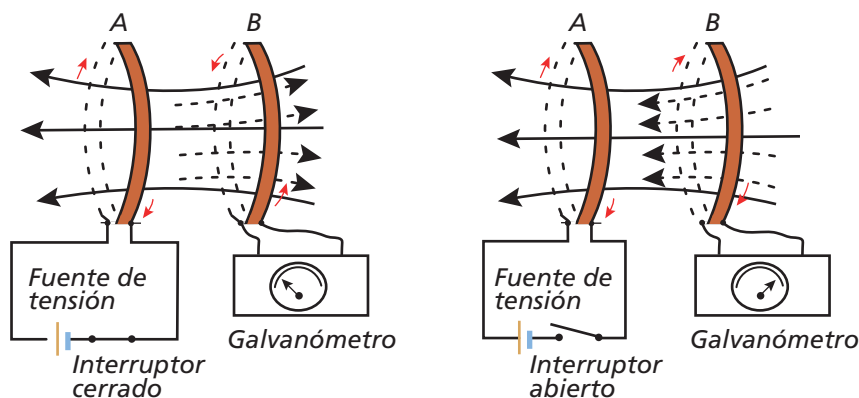


Fig. 5.27

7. Explica cómo se origina la fuerza electromotriz de inducción.
8. Explica el sentido de la corriente inducida en cada conductor de la figura 5.28.

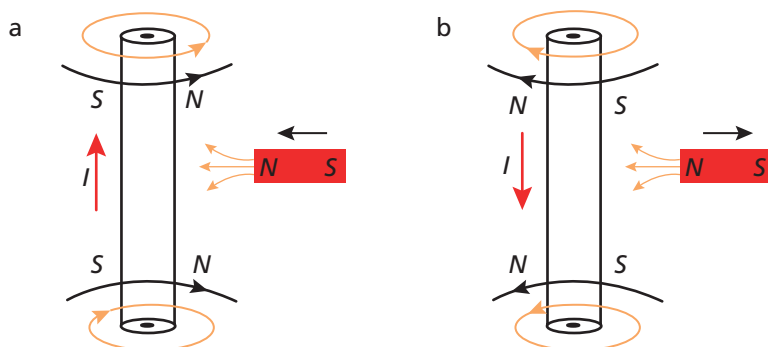


Fig. 5.28

9. En la figura 5.29, los extremos de una varilla que puede girar libremente alrededor de un eje vertical están sujetos dos anillos conductores de aluminio. Uno de ellos está cortado. Explica que sucede:
- Si se acerca un imán al anillo no cortado.
 - Si el imán se aleja del anillo no cortado.
 - Si el imán se aleja del anillo cortado



Fig. 5.29

- d. Si el imán se acerca al anillo cortado
e. Analiza si se cumple el principio de conservación de la energía.

10. En cada uno de los casos de la figura 5.30, la cara de la espira más próxima al imán, ¿actuará como un polo norte o como un polo sur?

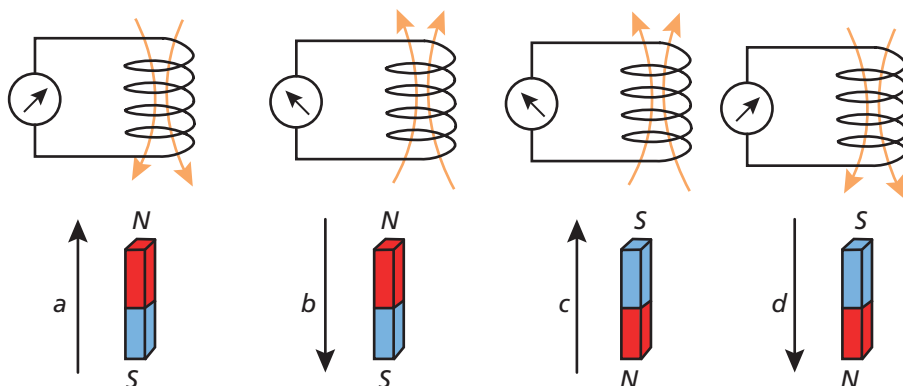


Fig. 5.30

11. El imán de la figura 5.31 se mueve alejándose de la bobina. Determina el sentido de la corriente inducida en la bobina.

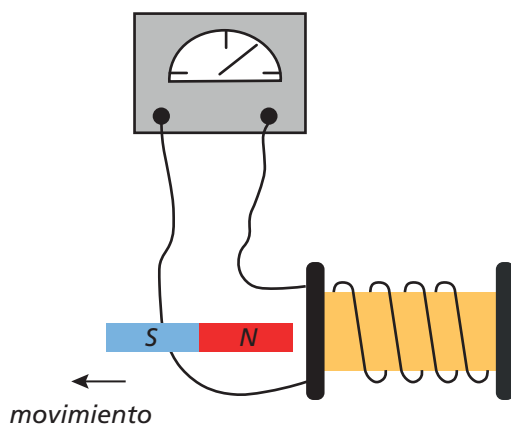


Fig. 5.31

12. Dos de los experimentos realizados por Faraday acerca de la inducción se muestran en las siguientes figuras. En la figura 5.32 hay dos bobinas enrolladas (A y B) sobre extremos de un anillo de hierro dulce D y en la figura 5.33 una barra de hierro dulce B atraviesa un solenoide A que está conectado a un galvanómetro sin intermediar interruptor alguno. C y D son imanes permanentes que entran en

contacto con B. Describe cómo se demuestra con estos montajes el fenómeno de la inducción.

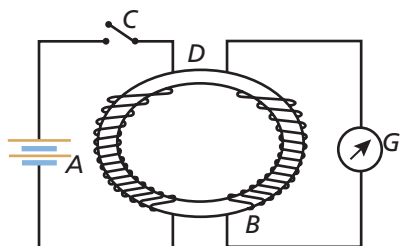


Fig. 5.32

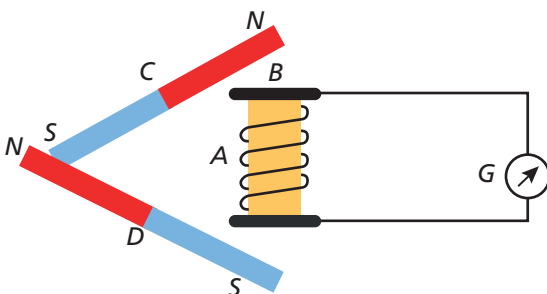


Fig. 5.33

5.3 Algunas aplicaciones de la inducción electromagnética

Generador de corriente alterna

En la figura 5.34 se representa un modelo simplificado para explicar el principio de funcionamiento de los generadores de corriente eléctrica basados en el fenómeno de la inducción electromagnética.

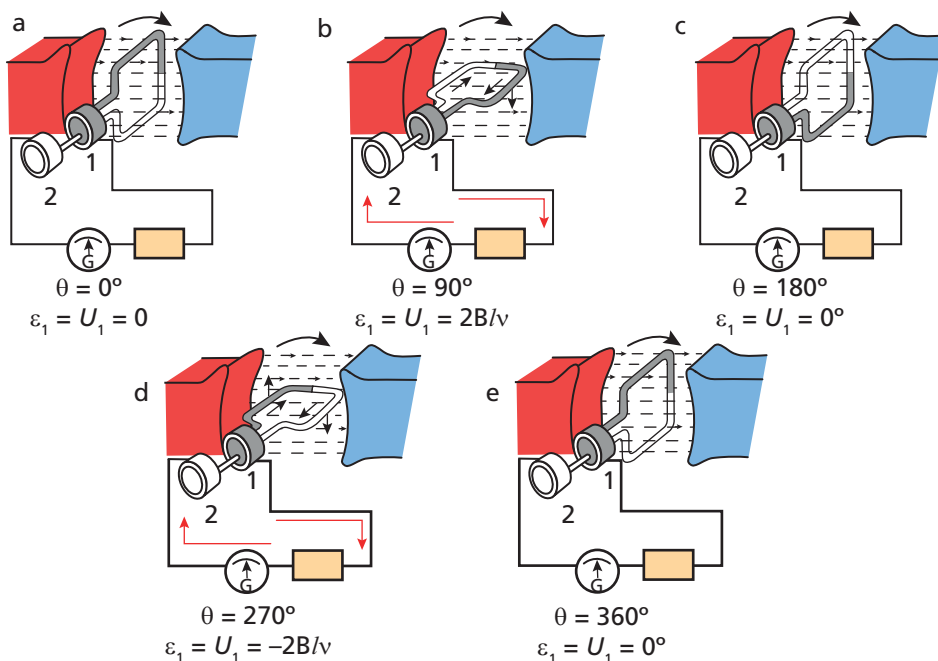


Fig. 5.34

El modelo consiste en una espira rectangular cuyas terminales están conectadas a través de anillos giratorios a un galvanómetro. La espira está ubicada en un campo magnético uniforme.

Al girar la espira sus lados se mueven a través del campo magnético. Por esta razón, en cada uno de ellos se induce una tensión cuyo valor, como conocemos, se puede calcular mediante la ecuación:

$$U_i = Blv \sin \theta$$

La tensión resultante de ambos lados de la espira es el doble de este valor, o sea,

$$U_i = 2Blv \sin \theta$$

A medida que la espira gira, el ángulo θ varía. Así al pasar la posición de la figura 5.34 a, a la 5.34 b el ángulo varió de $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 90^\circ$, y después, al pasar de esta posición a la de la figura 5.34 c, varía de $\theta = 90^\circ$ a $\theta = 180^\circ$.

Durante el proceso mencionado, el valor de la tensión inducida primero aumenta del valor $U_i = 0$ al valor $U_i = 2Blv$. Después, al sobrepasar los 90° , comienza a disminuir y cuando la espira gira 180° , la tensión inducida se anula, ya que en este caso la dirección de la velocidad $\vec{v}$ es paralela a $\vec{B}$.

Cuando la espira pasa de la posición que se muestra en la figura 5.34 c a la 5.34 d, el ángulo θ varía de 180° a 270° y la tensión comienza a aumentar de nuevo, pero con una polaridad invertida. Cuando la espira ha girado un ángulo de 270° la tensión inducida en ella es máxima y su valor es $U_i = -2Blv$; en este caso el ángulo formado por $\vec{v}$ y $\vec{B}$ es de 270° .

Al pasar la espira de la posición indicada en la figura 5.34 d a la 5.34 e el ángulo varía de 270° a 360° y la tensión disminuye hasta anularse cuando el ángulo es 360° , pues en esta posición la dirección de $\vec{v}$ es de nuevo paralela a $\vec{B}$.

La variación de la tensión se repite periódicamente a medida que la espira se mantiene girando. Si gira con una velocidad angular constante de valor ω entonces el ángulo θ depende del tiempo según la ecuación:

$$\theta = \omega t \quad 5.6$$

Se puede entonces escribir la ecuación para la tensión inducida como

$$U_i = 2Blv \sin \omega t \quad 5.7$$

Como $2B\ell v$ será el valor máximo de la tensión inducida $U_{i\text{máx}}$, se puede escribir que:

$$U_i = U_{i\text{máx}} \text{sen}\omega t \quad 5.8$$

La tensión que varía en correspondencia con esta ecuación recibe el nombre de tensión alterna sinusoidal y su representación gráfica en función del tiempo se muestra en la figura 5.35 para el caso en que el ángulo sea $\pi/2$.

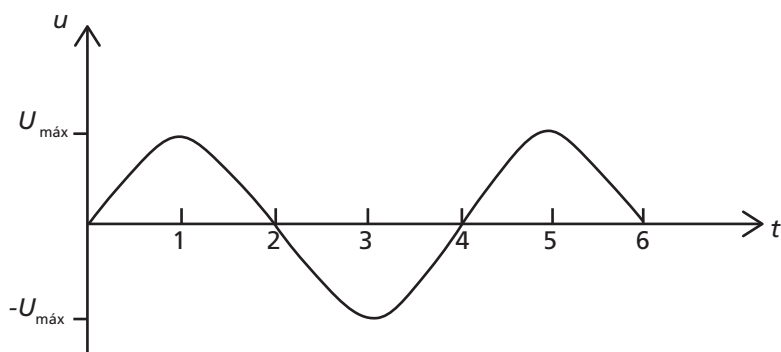


Fig. 5.35



De la historia

En 1832, o sea un año después del anuncio del descubrimiento de Faraday, Hippolyte Pixii, fabricante francés de herramientas, a sugerencia de Faraday, construyó el primer generador de electricidad.

Desde la década del 30 del siglo XIX se fueron perfeccionando diferentes dispositivos para hacerlos más eficientes; sin embargo, el uso masivo de estos aparatos no fue hasta la década del 80 de ese siglo. El motivo principal no fue técnico, sino económico. En efecto, la industria europea de mediados del siglo XIX estaba basada en unidades productoras de fuerza motriz muy grandes, como las máquinas de vapor estacionarias en las fábricas, y en las locomotoras y motores marinos para el transporte. La creciente mecanización de las industrias menores dio lugar a la construcción de pequeñas unidades también accionadas por vapor. Hacia la octava década del siglo se empezaron a usar máquinas que utilizaban gas y luego gasolina. Estos fueron los primeros motores de combustión interna.

Sin embargo, para la industria el motor eléctrico era un medio más flexible y práctico para disponer de fuerza motriz que los motores de vapor, gas o gasolina. Pero la posibilidad de utilizar masivamente el motor eléctrico dependía de que se contara con una amplia red de abastecimiento de energía eléctrica, la cual solamente se pudo construir cuando se creó una necesidad más fuerte que la pura demanda industrial. Esta necesidad surgió con la evolución de los servicios domésticos, en particular el de la iluminación eléctrica.

El transformador

El primer transformador fue construido por Faraday cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética.

Un transformador consiste, en esencia, en dos devanados de alambre denominados primario (P) y secundario (S), que están enrollados sobre un núcleo de hierro (figura 5.36 a). Este dispositivo, para su estudio, se esquematiza de la forma que aparece en la figura 5.36 b

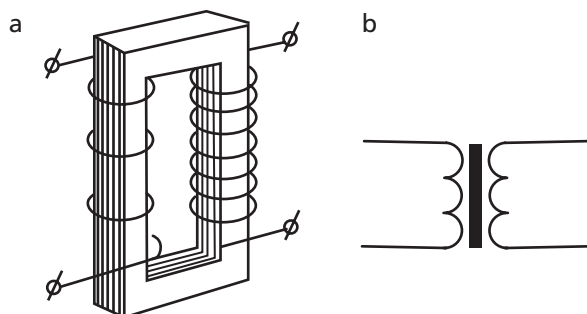


Fig. 5.36

Cuando por el devanado primario pasa una corriente que varía con el tiempo, en el núcleo aparece un flujo magnético también variable en el tiempo, que provoca una tensión inducida en cada enrollado. La función del núcleo de hierro en los transformadores es concentrar el campo magnético de tal modo, que el flujo de inducción magnética prácticamente solo exista dentro de dicho núcleo y sea igual en todas sus secciones.

Por consiguiente, la variación del flujo de inducción magnética en cualquier espira del enrollado primario, o del secundario, es la misma. De acuerdo con la ley de inducción electromagnética, este valor se determina por:

$$U_i = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad 5.9$$

Supongamos que el devanado primario tiene n_1 espiras. Entonces, la tensión inducida total en el será:

$$U_{i_1} = -n_1 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Si el secundario tiene n_2 espiras, la tensión inducida en el será:

$$U_{i_2} = -n_2 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

La variación del flujo en el tiempo $\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$, es la misma para los dos enro-llados, se puede plantear que:

$$\frac{U_{i_1}}{U_{i_2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

Esta expresión nos dice que la relación entre la tensión en el primario y en el secundario es igual a la relación entre los números de vueltas de los devanados respectivos.

Esta ecuación también se puede escribir como:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad 5.10$$

Donde si U_1 es el valor instantáneo (o eficaz) de la tensión alterna apli-cada en el devanado primario, U_2 será la que se obtenga en el devanado secundario.

En un transformador la potencia consumida en el circuito primario es aproximadamente igual a la que puede suministrar el circuito secundario, se tendrá entonces que.

$$P_1 = P_2$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

De donde se puede obtener que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad 5.11$$

Esta ecuación nos expresa que en la misma proporción que un trasfor-mador puede aumentar o disminuir la tensión aplicada al devanado pri-mario, la corriente disminuirá o aumentará en la misma proporción según sea el caso.

Cuando los transformadores elevan la tensión se acostumbran a llamar elevadores y cuando la disminuyen reductores.

Problema resuelto 5.11

La potencia que toma de la red un transformador es de 120 W, a 110 V. Considerando que en el transformador no se disipa energía, determina la:

- intensidad de la corriente en el primario;
- potencia en el secundario;
- intensidad de la corriente en el secundario, si la tensión es de 330 V;
- relación entre el número de vueltas del primario y el secundario.

Solución:

La corriente en el primario se puede calcular directamente en función de los datos a partir de la ecuación:

$$P_1 = I_1 U_1$$

De donde:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1}$$

$$I_1 = \frac{140 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 1,27 \text{ A}$$

Como no hay pérdidas de potencia, entonces:

$$P_2 = P_1 = 140 \text{ W}$$

La corriente en el secundario también se puede determinar a partir de la ecuación:

$$P_2 = I_2 U_2$$

De donde:

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{140 \text{ W}}{330 \text{ V}} = 0,42 \text{ A}$$

La relación entre los números de vueltas se puede calcular directamente a partir de la ecuación:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{110 \text{ V}}{330 \text{ V}} = \frac{1}{3}$$

Problema resuelto 5.12

En el caso de un transformador, el coeficiente de rendimiento (η) se define como la relación entre las potencias en el secundario y en el primario:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \% \quad 5.11$$

Si el coeficiente de rendimiento de un transformador es del 94 %. Las tensiones en el primario y en el secundario son de 2 500 V y 220 V respectivamente y la corriente en el secundario de 60 A, ¿cuál es la intensidad de la corriente en el primario?

Solución:

Como $P = IU$, entonces $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$

$$\eta U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Por lo tanto

$$I_1 = \frac{U_2 I_2}{U_1}$$

$$I_1 = \frac{220 \text{ V} \cdot 60 \text{ A}}{2500 \text{ V} \cdot 0,94} = 5,6 \text{ A}$$

Hora del laboratorio

El transformador

Objetivo: estudiar, de forma experimental, el funcionamiento de un transformador.

Materiales: una bobina de 1 000 espiras, una bobina de 500 espiras, un núcleo de hierro en forma de U, un núcleo recto, una fuente de corriente, dos instrumentos de medición, dos portalámparas, dos lámparas de incandescencia de 6 V; 0,6 W; 2 tableros receptáculos, 2 interruptores.

Descripción y tareas:

Monta un circuito similar al que se muestra en la figura 5.37. Observa que en este caso la fuente debe conectarse con la bobina de 1 000 espiras. ¿Cuál es el enrollado primario y cuál el secundario?

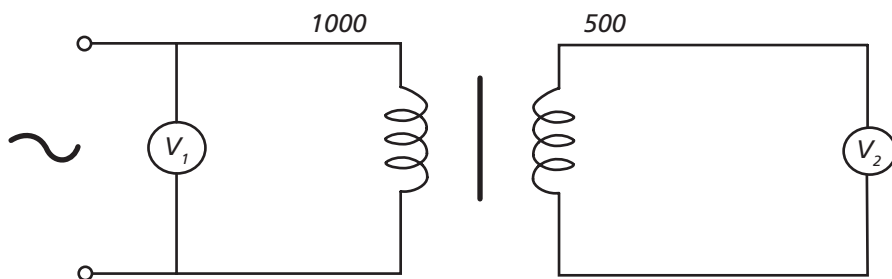


Fig. 5.37

Mide y anota los valores de las tensiones del primario y del secundario en la tabla 5.1. ¿Qué tipo de transformación es esta? Conecta el voltímetro entre las tomas de 250 espiras del secundario. ¿Cuánto vale la tensión en este caso? Haz las anotaciones en la tabla.

Invierte la conexión del transformador con la fuente, o sea, conecta ahora la bobina de 500 espiras con la fuente. Determina de nuevo

los valores de la tensión. Calcula la relación de transformación para este caso.

Tabla 5.1

Tensión en el primario	Número de espiras en el primario	Tensión en el secundario	Número de espiras en el secundario



Saber más

Generación y distribución de energía eléctrica

Es difícil imaginarse la vida de la sociedad en nuestros días sin el empleo de la energía eléctrica. El nivel de desarrollo de cualquier país está muy relacionado con la capacidad que este tenga de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica en todo su territorio. Es fundamental que este proceso se realice de forma eficiente, fundamentalmente para aquellos países que no posean grandes recursos económicos y naturales, aunque para cualquier territorio esa eficiencia es esencial por cuestiones ambientalistas.

La generación de electricidad es el proceso de transformar alguna fuente primaria de energía, ya sean estas agotables o renovables, en energía eléctrica, que es una fuente secundaria. La generación y transporte de la energía eléctrica tiene importantes ventajas económicas, lo que está dado por el relativo bajo costo por unidad de energía generada. La gran importancia de la generación de la electricidad está dada en que esta se puede distribuir con gran facilidad a grandes distancias del sitio desde donde se generó. Se suele utilizar la corriente alterna (aunque existen casos de transmisión de la corriente continua con grandes valores de tensión y elevada potencia, lo que conduce a menores pérdidas), ya que es fácil reducir o elevar la tensión mediante los transformadores, así cada parte del sistema de distribución de la energía eléctrica puede funcionar con la tensión apropiada.

En la figura 5.38 se representan, de forma simplificada, las etapas principales del proceso de distribución de la electricidad, desde su generación hasta los usuarios industriales o residenciales.

En la actualidad para hacer llegar la electricidad hasta las industrias y las casas existen y se construyen centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, nucleares y generadores eólicos, entre otras.

Analicemos ahora, de forma resumida, las características de algunas de centrales eléctricas y sus implicaciones para el medio ambiente.

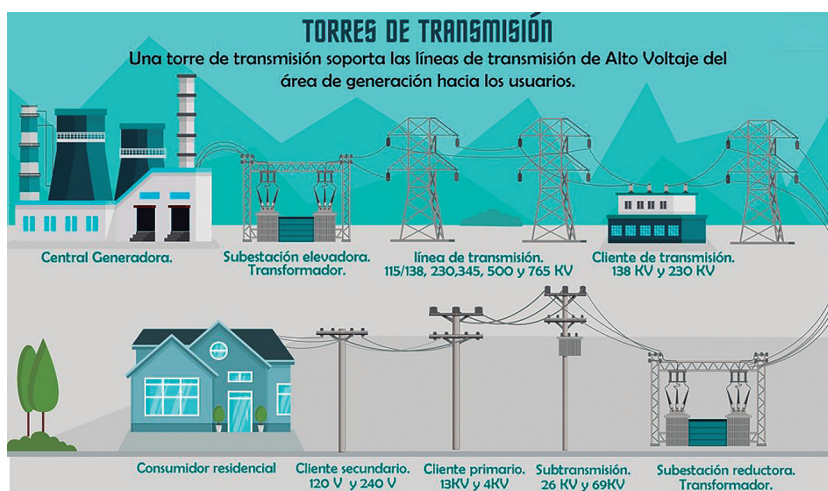


Fig. 5.38

Centrales termoeléctricas e hidroeléctricas

Una **central hidroeléctrica** es aquella que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Es el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda. En general, estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual trasmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas y las centrales térmicas (que usan combustibles fósiles) producen la energía eléctrica de una manera muy similar. En ambos casos la fuente de energía es usada para impulsar una turbina que hace girar un generador eléctrico, que es el que produce la electricidad. Una central térmica usa calor para, a partir de agua, producir el vapor que acciona las paletas de la turbina, en contraste con la planta hidroeléctrica, la cual usa la fuerza del agua directamente para accionar la turbina.

Aunque en Cuba los recursos hidráulicos no permiten la instalación de grandes centrales hidráulicas, existen un total de 162 centrales hidroeléctricas pequeñas con una potencia total instalada de 71,9 MW, de ellas 34 están conectadas al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y 128 brindan servicio de forma aislada a viviendas y objetivos económicos y sociales (figura 5.39).



Fig. 5.39 Vistas de la central hidroeléctrica Hanabanilla en la provincia de Las Villas. Esta central es la mayor de Cuba y en la actualidad aporta 28 MW al sistema eléctrico nacional

Los potenciales impactos ambientales de los proyectos hidroeléctricos son siempre significativos. La construcción y operación de la represa y el embalse constituyen la fuente principal de impactos del proyecto hidroeléctrico. Los proyectos de las represas de gran alcance pueden causar cambios ambientales irreversibles en un área geográfica muy extensa; por eso, tienen el potencial de causar impactos importantes. Los críticos más severos sostienen que los costos sociales, ambientales y económicos de estas represas pesan más que sus beneficios y que, por lo tanto, no se justifica la construcción de las represas grandes. Otros mencionan que, en algunos casos, los costos ambientales y sociales pueden ser evitados o reducidos a un nivel aceptable, si se evalúan cuidadosamente los problemas potenciales y se implantan medidas correctivas que son costosas. El beneficio obvio del proyecto hidroeléctrico es la energía eléctrica, la que puede apoyar al desarrollo económico y mejorar la calidad de la vida en el área servida. Los proyectos hidroeléctricos requieren mucha mano de obra y ofrecen oportunidades de empleo. Los caminos y otras infraestructuras pueden dar a los pobladores mayor acceso a los mercados para sus productos, escuelas para sus hijos, cuidado de salud y otros servicios sociales. Además, la generación de la energía hidroeléctrica proporciona una alternativa para la quema de los combustibles fósiles, o la energía nuclear, que permite satisfacer la demanda de energía sin producir agua caliente, emisiones atmosféricas, ceniza, desechos radioactivos ni emisiones de CO_2 . Si el reservorio es, realmente, una instalación de usos múltiples, es decir, si los diferentes propósitos declarados en el análisis económico no son mutuamente inconsistentes, los otros beneficios pueden incluir el control de

las inundaciones y la previsión de un suministro de agua más confiable y de más alta calidad para riego, y uso doméstico e industrial.

Una **central termoeléctrica**, por su parte, es contaminante pues libera dióxido de carbono. Por otro lado, también existen centrales termoeléctricas que emplean fisión nuclear del uranio para producir electricidad. Este tipo de instalación recibe el nombre de **central nuclear**.

Centrales termoeléctricas de ciclo combinado

En la actualidad se están construyendo numerosas centrales termoeléctricas de las denominadas de *ciclo combinado* (figura 5.40), que son un tipo de central que utiliza gas natural, gasóleo o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas. Luego los gases de escape de la turbina de gas todavía tienen una elevada temperatura, se utilizan para producir vapor que mueve una segunda turbina, esta vez de vapor. Cada una de estas turbinas está acoplada a su correspondiente alternador para generar la electricidad como en una central termoeléctrica clásica. La emisión de residuos a la atmósfera y los propios procesos de combustión que se producen en las centrales térmicas tienen una incidencia importante sobre el medio ambiente. Para tratar de atenuar, en la medida de lo posible, los daños que estas plantas provocan en el entorno natural, se incorporan a las instalaciones diversos elementos y sistemas. El problema de la contaminación es máximo en el caso de las centrales termoeléctricas convencionales que utilizan como combustible carbón.



Fig. 5.40 Instalaciones de la central eléctrica de ciclo combinado Energas en Boca de Jaruco

Instalaciones nucleares

Las instalaciones nucleares son construcciones muy complejas por la variedad de tecnologías industriales empleadas y por la elevada seguridad con la que se les dota. Las características de la reacción nuclear hacen que pueda resultar peligrosa si se pierde su control y prolifera por encima de una determinada temperatura a la que funden los materiales empleados en el reactor, así como si se producen escapes de radiación nociva por esa u otra causa. La energía nuclear se caracteriza por producir, además de una gran cantidad de energía eléctrica, residuos nucleares que hay que albergar en depósitos aislados y controlados durante largo tiempo. A cambio, no produce contaminación atmosférica de gases derivados de la combustión que producen el efecto invernadero, ni precisan el empleo de combustibles fósiles para su operación. Sin embargo, las emisiones contaminantes indirectas derivadas de su propia construcción, de la fabricación del combustible y de la gestión posterior de los residuos radiactivos (se denomina gestión a todos los procesos de tratamiento de los residuos, incluido su almacenamiento) no son despreciables.

Energía eólica

El aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, mediante un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etcétera.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica (figura 5.41), distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.



Fig. 5.41 Parque eólico experimental en Gibara

Ya en la primera mitad del siglo xx, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

Este tipo de generadores se ha popularizado rápidamente al ser considerados una fuente limpia de energía renovable, ya que no requieren, para la producción de energía, una combustión que produzca residuos contaminantes o gases implicados en el efecto invernadero. Sin embargo, su uso no está exento de impacto ambiental. Su localización (frecuentemente en lugares apartados de elevado valor ecológico, como las cumbres montañosas, que por no encontrarse habitadas conservan su riqueza paisajística y faunística) puede provocar efectos perniciosos, como el impacto visual en la línea del horizonte, el intenso ruido generado por las palas, etcétera, además de los causados por las infraestructuras que es necesario construir para el transporte de la energía eléctrica hasta los puntos de consumo. Pese a que se investiga para minimizarlas, se siguen produciendo muertes de aves por su causa, además de que se ven afectadas las poblaciones de quirópteros. Más recientemente, se ha propuesto la posibilidad de que su uso generalizado podría incluso contribuir al calentamiento global al bloquear las corrientes de aire.

Esta contaminación siempre será menor que la nuclear o la combustión sólida y con menos coste inicial para los ciudadanos. En cuanto a las medidas de seguridad e higiene, los gastos no son tan ingentes como los de las energías anteriormente citadas. Por otro lado, su disponibilidad no es constante, pues no siempre existe esa energía eólica necesaria para mover esas aspas (algunas de más de 50 m de longitud).

Cuba tiene en activo cuatro parques eólicos ubicados en Holguín, Ciego de Ávila y la Isla de la Juventud, que aportan en conjunto al sistema electroenergético nacional unos 11 700 MW de potencia. Los parques eólicos Herradura 1 y 2, serán los de mayor envergadura con 32 y 20 aerogeneradores respectivamente.

Comprueba tus conocimientos

- 13.** Sobre la base del fenómeno de inducción electromagnética, explica el principio de funcionamiento de un generador de tensión.
- 14.** Explica el principio de funcionamiento de un transformador.
- 15.** Describe el modelo básico de generación y distribución de energía eléctrica.

5.4 Autoinducción e inductancia

En el circuito representado en la figura 5.42 las lámparas son iguales y también el valor de la resistencia de las ramas son iguales (el resistor R_1 tiene una resistencia igual a la del alambre con que se construyó la bobina).

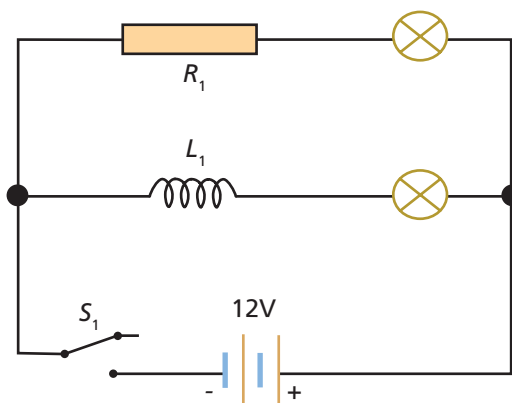


Fig. 5.42 Al cerrar el interruptor, la lámpara conectada con R_1 alcanza su máxima iluminación antes que la lámpara conectada con L_1

Sin embargo, cuando se cierra el interruptor la lámpara conectada con el resistor alcanza su máxima iluminación casi instantáneamente, pero la lámpara conectada a la bobina demora un tiempo apreciable para encenderse. *¿Por qué sucede esto?*

Cuando se cierra el interruptor, la corriente se establece en el circuito muy rápidamente, pero no de manera instantánea. Una parte de la corriente total comienza a circular por la rama donde está el resistor y la otra por la rama donde está la bobina.

En este último caso en la bobina aparece un campo magnético que, de acuerdo con la ley de Faraday y la regla de Lenz, provocará una tensión inducida (fem inducida) que se opone a la causa que la produce, es decir una tensión con una polaridad contraria a la de la fuente. Esta tensión se opone al paso de la corriente por esta rama hasta que el campo magnético de la bobina deja de aumentar, entonces, cesa la tensión inducida y por ambas ramas circulará la misma intensidad de corriente (figura 5.43).

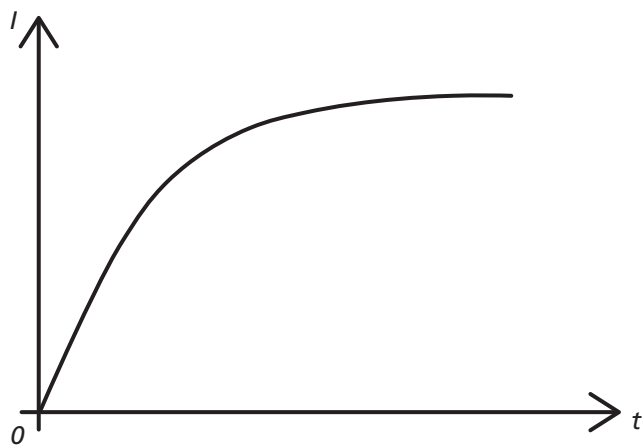


Fig. 5.43 La gráfica muestra la forma en que varía la intensidad del corriente por la rama del circuito donde está conectada la bobina

Cuando se desconecta la fuente, la corriente en el circuito cerrado (la malla formada por las dos lámparas, la bobina y el resistor) no cesa en el mismo instante en que se abre el interruptor y las lámparas siguen iluminando brevemente, incluso se produce un destello de gran luminosidad. Esto ocurre porque al abrir el interruptor, en la bobina surge una tensión autoinducida que se opone a la disminución del flujo magnético. Dada la

rapidez con que se produce esta variación el valor de la tensión inducida es mayor que las de la propia fuente y ello da lugar al breve aumento de la intensidad de la corriente en el circuito.

Se puede demostrar que la tensión o *fem* autoinducida en una bobina (u otro conductor) está dada por la ecuación:

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad 5.12$$

Donde L es una magnitud que depende de las características geométricas de la bobina y se denomina *inductancia* de la bobina o, en general, del conductor.

La unidad de inductancia en el SI se denomina Henry (H). De acuerdo con la ecuación 5.12, la inductancia de un conductor es igual a 1,0 H si, cuando la intensidad de la corriente varía 1,0 A en 1,0 s; se produce en él una *fem* autoinducida de 1,0 V. Es decir:

$$1 \text{ H} = \frac{1,0 \text{ V}}{1,0 \text{ A/s}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

Para el caso de un solenoide (bobina de espiras apretadas) largo, sin núcleo, la inductancia se puede calcular mediante la fórmula:

$$L = \mu_0 N^2 S / l \quad 5.13$$

Donde:

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$ es la permeabilidad magnética del vacío (o del aire aproximadamente),

N es el número de espiras,

S es el área de la sección transversal y l la longitud.

Por otra parte, como se ha analizado, en el caso de la corriente directa las bobinas solo presentan una oposición inicial al establecimiento de la corriente, pero en el caso de la corriente alterna esta oposición es permanente y puede ser tan alta que impida casi totalmente el paso de la corriente. Como veremos más adelante, este efecto tiene muchas aplicaciones prácticas en el diseño de los circuitos eléctricos y electrónicos.

Problema resuelto 5.13

Determina la inductancia de una bobina en la cual, al variar la intensidad de la corriente 0,04 A durante 0,02 s, se induce una *fem* de 40 V.

Solución:

En este problema se debe determinar la inductancia de una bobina en la cual tiene lugar el fenómeno de la autoinducción.

Conocemos que:

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Despejando L , obtenemos:

$$L = \varepsilon_i \frac{\Delta t}{\Delta I}$$

Sustituyendo los valores numéricos, nos queda:

$$L = \frac{(40 \text{ V})(0,02 \text{ s})}{0,04 \text{ A}}$$

$$L = 20 \text{ H}$$

Hora del laboratorio

Fenómeno de autoinducción

Objetivo: Comprobar mediante estos experimentos el fenómeno de la autoinducción originada en un enrollado

Instrumentos y materiales

Bobina de 500 espiras, núcleo de hierro en forma de U, núcleo en forma de I, reóstato de 0 – 50 Ω , interruptor, fuente de corriente, 10 cables de conexión, 4 tableros receptáculos de dispositivos eléctricos intercambiables, dos lámparas de incandescencia de 1,8 V y 0,2 A, lámpara de destellos.

Indicaciones para el trabajo:

Monta un circuito como el representado en la figura 5.44. En esta L representa la bobina de 500 espiras que se encuentra colocada en el núcleo en forma de U, el cual está cerrado magnéticamente por el núcleo en forma de I.

Cierra el interruptor K . Desplaza el cursor del reóstato hasta que la iluminación sea idéntica en ambas lámparas.

Abre el interruptor. Cierra el interruptor y observa que sucede en el circuito. Repite varias veces esta operación. Explica las causas de las

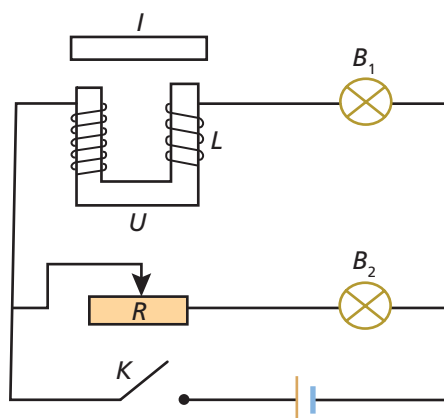


Fig. 5.44

diferencias momentáneas que se producen en las iluminaciones de las lámparas al cerrar el interruptor.

Monta un nuevo circuito como el representado en la figura 5.45.

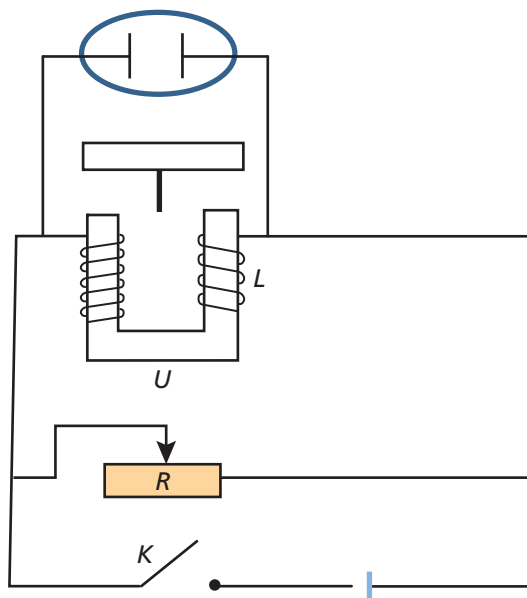


Fig. 5.45

Toma la lámpara de destellos y comprueba que esta no se ilumina con las tensiones de salida que posee la fuente con que se está trabajando. Conecta posteriormente la lámpara en paralelo con la bobina, cierra el interruptor y luego ábrelo. Repite el experimento. Explica los resultados.

Al circuito de la figura 5.45 instálale una lámpara en serie, con L . Con el interruptor k abierto, separa el núcleo I del núcleo U . Cierra el interruptor. Desplaza el cursor del reóstato hasta un valor tal que las lámparas brillen muy débilmente. Cierra el circuito magnético al colocar el núcleo I sobre el núcleo U . Luego separa el núcleo I . Repite el experimento. ¿Qué se aprecia en la iluminación de la lámpara al colocar y quitar el núcleo de I ?

Añade al circuito una pila elementos con una pila seca de 1,5 V. Observa que en dependencia de la forma en que se coloca la pila en el circuito la lámpara se comportará de forma semejante a como cuando se colocaba o quitaba el núcleo I . Determina la polaridad de la *fem* inducida al poner y quitar el núcleo. Haz las representaciones necesarias en un esquema semejante al de la figura 5.45.

Comprueba tus conocimientos

16. Explica en qué consiste el fenómeno de la autoinducción.
17. ¿Qué sentido, respecto al de la corriente, tiene el campo eléctrico rotacional en un conductor cuando la intensidad de la corriente aumenta y cuando disminuye?
18. En mecánica estudiamos que la velocidad de un cuerpo no cambia de forma instantánea. Ahora hemos visto que, a causa de la autoinducción, al cerrar el circuito la intensidad de la corriente no adquiere en el acto un valor determinado, sino que va aumentando poco a poco y cuando la fuente es desconectada, la corriente no se interrumpe inmediatamente. ¿Qué analogía existe entre ambos casos?
19. Explica a que se llama inductancia de un conductor.
20. ¿En qué unidades se mide la inductancia?
21. ¿A qué es igual la fem de autoinducción?
22. En mecánica definimos la masa como medida de la inercialidad, es decir, la medida de la oposición al cambio de la velocidad del cuerpo. Ahora, podemos interpretar L como la medida de la oposición a la variación de la corriente. ¿Existe una analogía entre ambas magnitudes? Discute esta idea.

5.5 Energía del campo magnético de una corriente

Conocemos que la energía potencial en el campo electrostático entre las placas de un capacitor se puede calcular mediante la ecuación:

$$E_{pe} = \frac{1}{2}CU^2 \quad 5.14$$

Donde U es el valor de la diferencia de potencial entre las placas y C la capacidad del capacitor.

¿Cómo será la ecuación para calcular la energía en el campo magnético de una bobina por la que circula una corriente de intensidad I ?

Supongamos que tenemos el circuito eléctrico que se representa en la figura 5.46. Cuando se cierra el interruptor k , la corriente comienza a circular por el circuito. Para que esto suceda, la fuente ε tiene que realizar

cierto trabajo, por tanto, parte de la energía entregada de la fuente se disipa en forma de calor en la resistencia R del bombillo; el resto se utiliza para vencer la oposición que ofrece la *fem* de autoinducción que aparece en la bobina. Es precisamente esta última la cantidad de energía es la que posee el campo magnético en el inductor, la tensión en el bombillo será $U_0 = \varepsilon - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Una vez que se establece un valor constante de la intensidad (estado estacionario) de la corriente, la energía de la fuente solo se consume en el desprendimiento de calor y la tensión en el bombillo será igual a la tensión de la *fem* $U_1 = \varepsilon$. En estas condiciones, la energía de la corriente ya no varía.¹

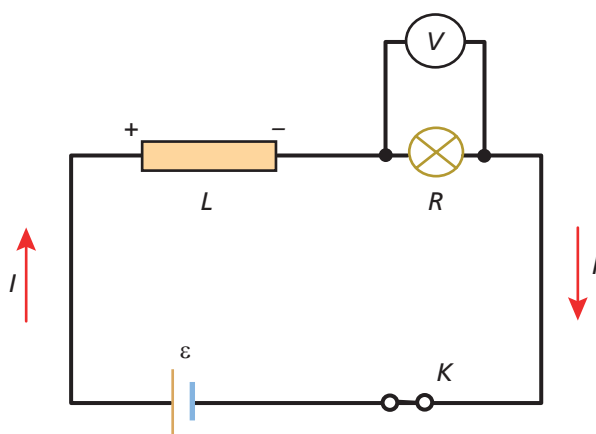


Fig. 5.46

Algo semejante sucede, como recordarás, para hacer que un automóvil (figura 5.47), partiendo del reposo, adquiera una velocidad constante v . Para ello hay que realizar un trabajo igual a $\frac{1}{2}mv^2$. Al inicio parte del trabajo realizado por el motor se gasta en vencer el rozamiento y parte en aumentar la velocidad del vehículo.

Cuando el automóvil desarrolla una velocidad constante, todo el trabajo realizado por el motor se gasta en vencer el rozamiento, mientras que la energía cinética del automóvil no varía.

¹ Solo se transforma la energía eléctrica del circuito en energía del campo magnético, o viceversa, durante el tiempo en que la corriente varía. Cuando la corriente se hace constante ($\Delta I = 0$), la energía del campo magnético es constante.

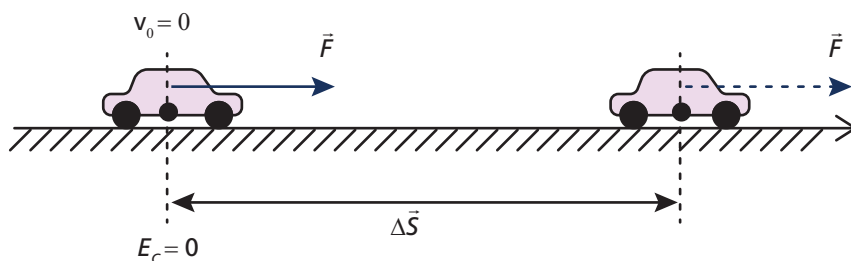


Fig. 5.47

Ya hemos discutido en las tareas del epígrafe 5.3 que existe cierta analogía entre la masa y la inductancia. La inductancia desempeña el mismo papel en electrodinámica que la masa cuando se quiere variar la velocidad en mecánica. El análogo de la velocidad del cuerpo es, en electrodinámica, la intensidad de la corriente I , como magnitud física que caracteriza el movimiento de la partícula cargada.

Guiándonos por esta idea, entonces la energía del campo magnético de una corriente se puede escribir como una magnitud física semejante a la energía cinética del cuerpo en mecánica $\frac{1}{2}mv^2$. De esta forma podemos escribir la energía del campo magnético de una corriente como:

$$E_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 \quad 5.15$$

Comprueba tus conocimientos

23. Demuestra que $\frac{1}{2}LI^2$ se expresa en unidades de energía.
24. Compara la expresión matemática que mide la energía del campo electrostático de un condensador, con la energía magnética de una bobina.
25. Tenemos un condensador de $10\mu\text{F}$ con una tensión en sus placas de 20 V. Compara la energía del condensador con la energía de una bobina de inductancia $L = 10\text{ H}$, por la que circula una corriente de 20 A.
26. ¿Dónde se almacena la energía de la corriente eléctrica?

Tareas generales del capítulo

1. Al conectar el galvanómetro a una fuente de corriente continua, como viene mostrado en la figura 5.48 a, la aguja del galvanómetro se desvió

hacia la izquierda. Di en qué dirección se desviará la aguja de este instrumento:

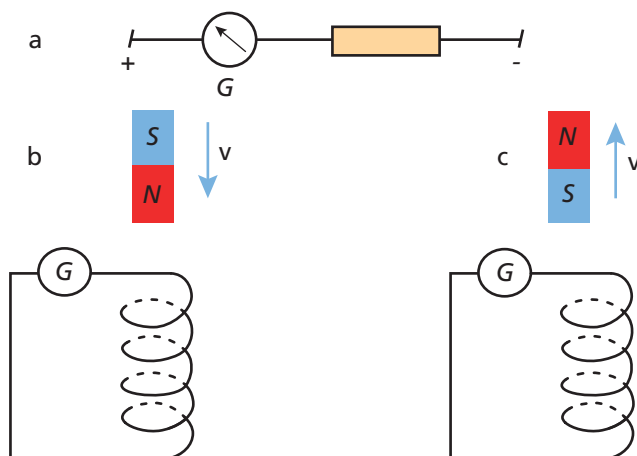


Fig. 5.48

- I. Al introducir un imán permanente por la parte del polo norte a la velocidad v en la bobina de la figura 5.48 b.
 - II. Al parar el imán dentro de la bobina.
 - III. Al sacar el imán permanente por la parte del polo sur de la bobina a la velocidad v
2. Dos bobinas, de 400 y 600 espiras respectivamente, están conectadas a un galvanómetro y a una fuente de corriente tal y como se ilustra en la figura 5.49. Si el interruptor se cierra:

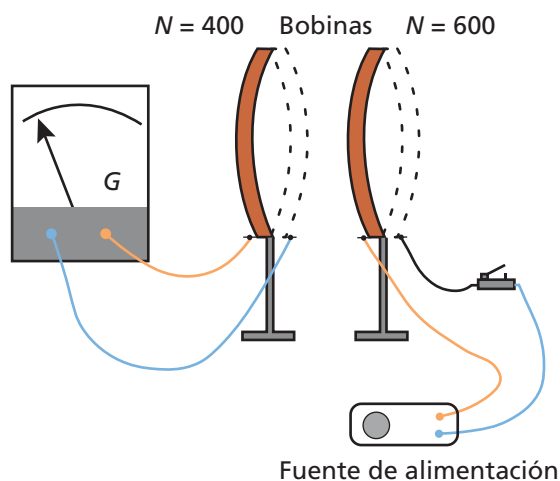


Fig. 5.49

- a) ¿Registrará corriente el galvanómetro? Explica tu respuesta. Si un tiempo después de cerrado el interruptor, la bobina de la izquierda se acercara a la de la derecha, ¿aparecerá corriente? Explica tu respuesta.
- b) Cuando el circuito de la derecha se desconecta, ¿surgirá corriente en el circuito de la izquierda? Explica tu respuesta.
3. Un imán de barra montado sobre un carrito se puede mover con respecto a una bobina que está en reposo sobre una mesa, la cual está conectada a un galvanómetro de alta sensibilidad, como se ilustra en la figura 5.50.

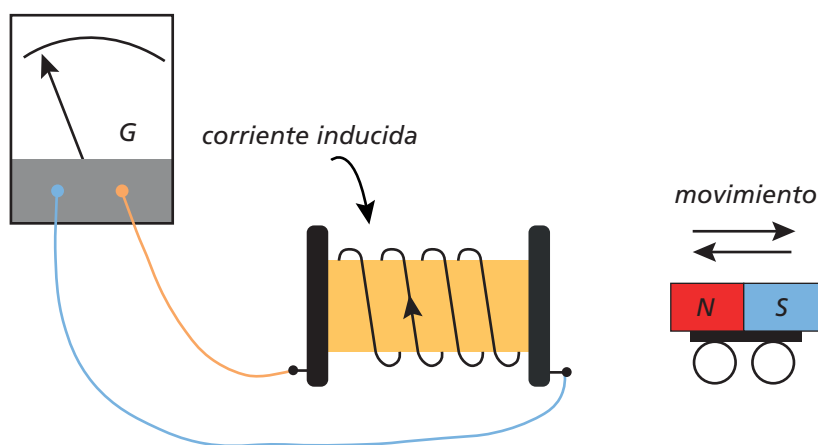


Fig. 5.50

- a) Si la corriente en la bobina circula en el sentido indicado al mover el imán, ¿este se habrá acercado o alejado de la bobina? Explica tu respuesta auxiliándote de los esquemas correspondientes.
- b) Indica la polaridad magnética en las caras de la bobina.
- c) ¿Cómo se denomina el fenómeno observado?
4. Dos bobinas están insertadas en un núcleo común. Una de ellas está conectada a una fuente de alimentación de corriente eléctrica, y la otra a un galvanómetro figura 5.51. Al cerrar el interruptor, en la bobina 2 aparece una corriente que registra el instrumento.
- a) Señala en la figura en qué sentido circula la corriente en el circuito 2.
- b) Representa (utilizando el modelo de las líneas de inducción) el campo magnético asociado a cada corriente al cerrar el interruptor.

- c) ¿Cuál es la causa de la aparición de esta corriente en la bobina 2?
- d) ¿Por qué la corriente cesa en la bobina 2 transcurrido un breve tiempo? ¿Bajo qué condiciones se podrá obtener corriente (todo el tiempo) en el circuito 2?

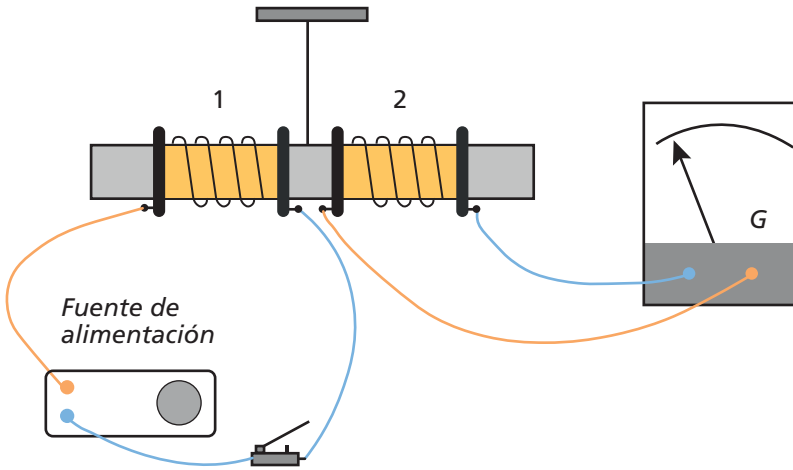


Fig. 5.51

5. La figura 5.52 muestra uno de los montaje experimental utilizado por M. Faraday para estudiar el fenómeno de la inducción electromagnética.

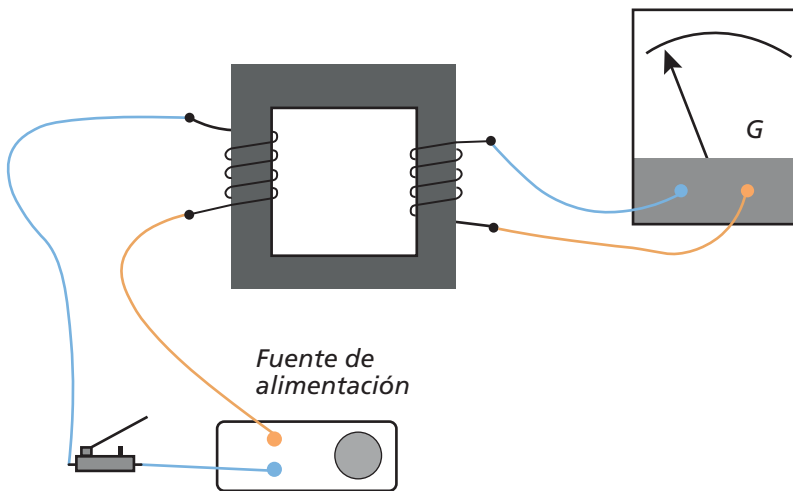


Fig. 5.52

- Si el circuito está cerrado, ¿registraré corriente el galvanómetro? Explica tu respuesta.
 - Encuentra (en la rama donde está el galvanómetro) el sentido en que circula la corriente que se induce en el momento que se abre este.
 - ¿Qué dispositivo electrotécnico funciona sobre la base del principio aquí descubierto? Menciona algunas de sus aplicaciones.
6. En la figura 5.53, ¿El interruptor se abrió o se cerró?

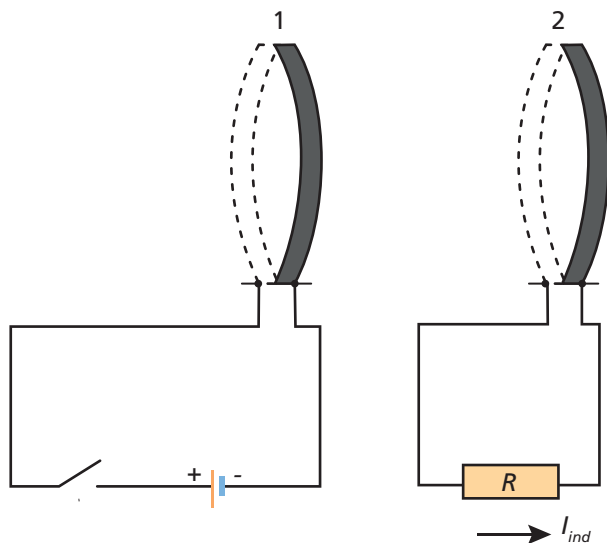


Fig. 5.53

7. En la bobina de la figura 5.54 ¿En qué sentido circula la corriente que se induce?

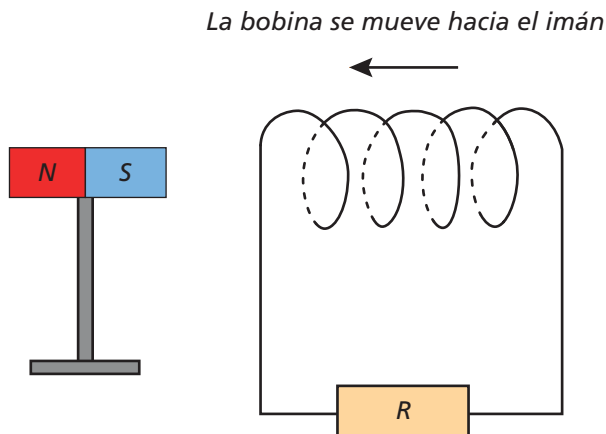


Fig. 5.54

8. En la figura 5.55 el circuito se abrió, ¿en qué sentido circula la corriente en la resistencia R ?

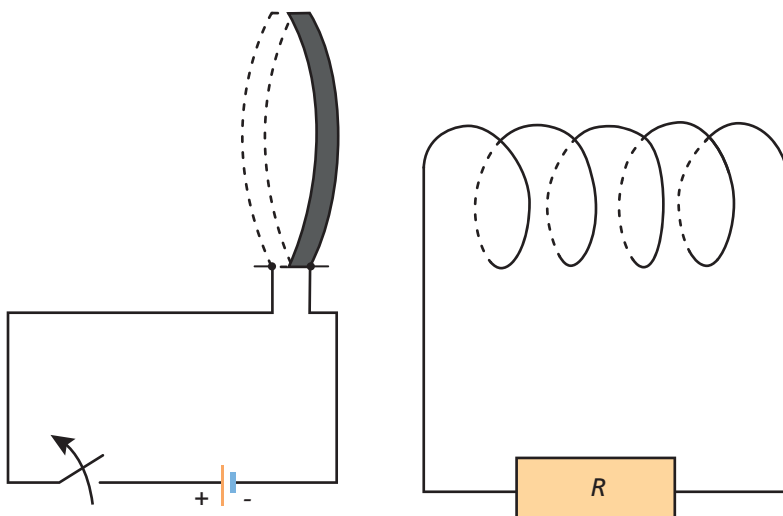


Fig. 5.55

9. En el circuito con las bobinas figura 5.56 ¿El circuito se abrió o se cerró?

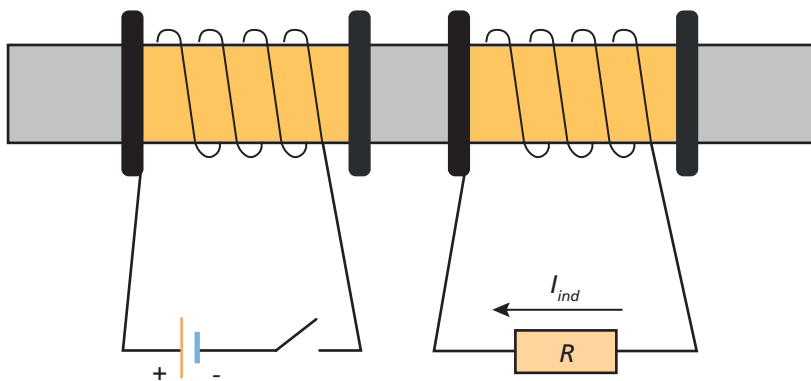


Fig. 5.56

10. Para la figura 5.57 El circuito 1 ya lleva cerrado un tiempo; el circuito 2 se mueve en el sentido indicado. Señala el sentido de la corriente inducida en este último.
11. La resistencia R en el circuito a la izquierda de la figura 5.58 aumenta a velocidad constante. ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el circuito de la derecha?

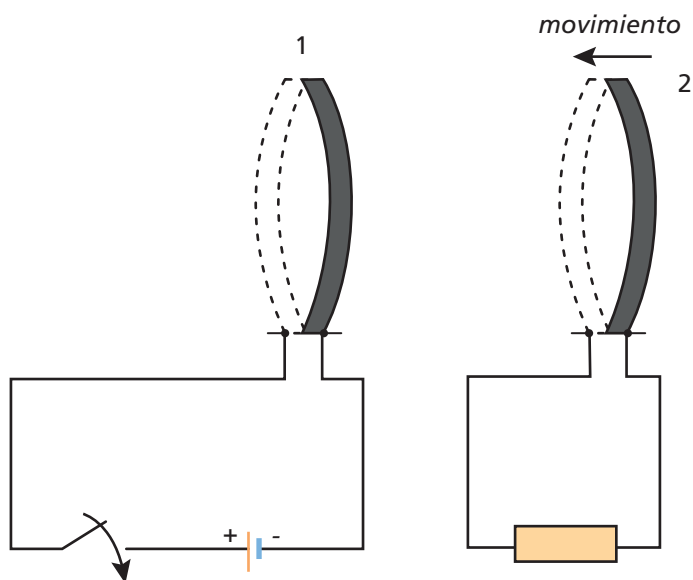


Fig. 5.57

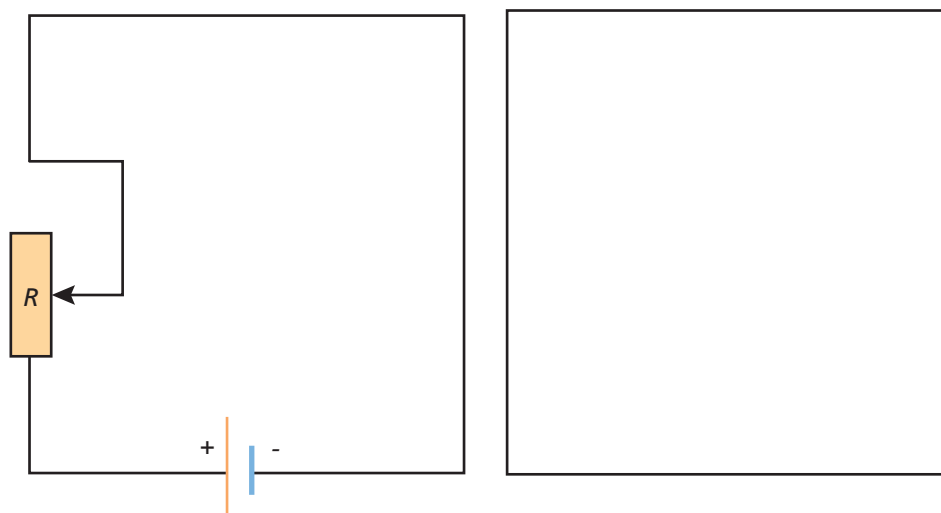


Fig. 5.58

12. En la figura 5.59, el segmento recto de alambre móvil se desplaza hacia la derecha a velocidad constante v . En la dirección mostrada aparece una corriente inducida. ¿Cuál es la dirección y sentido del campo magnético uniforme (supuesto como constante y perpendicular a la página) en la región A?

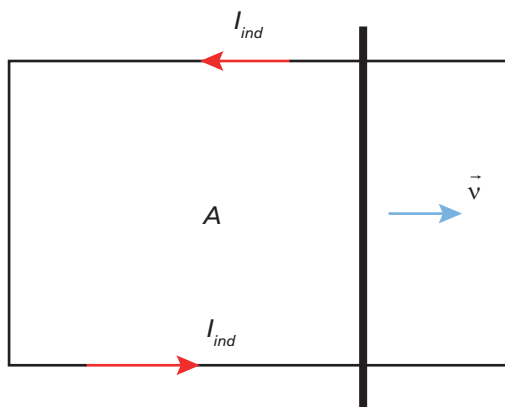


Fig. 5.59

13. La figura 5.60 muestra una espira conductora colgada de un hilo y una bobina que forma parte de un circuito de corriente directa. El interruptor del circuito se encuentra en una posición tal que por la bobina no circula corriente.

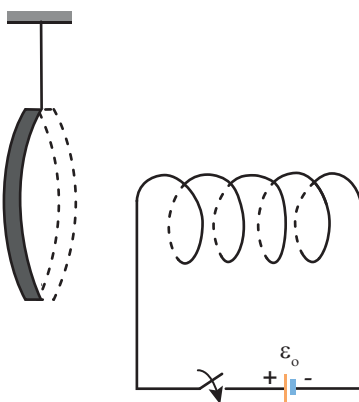


Fig. 5.60

- Representa las líneas de inducción magnética del campo magnético de la corriente que aparece en la bobina cuando se cierra el interruptor.
- Representa el sentido en que circula la corriente en la espira como resultado de esta acción.
- ¿Hacia dónde se mueve la espira al cerrar el interruptor? Argumenta tu respuesta.
- Si el flujo magnético varió con una rapidez de $0,4 \text{ Wb/s}$, ¿cuál es el valor de la fuerza electromotriz inducida (fem)?

14. En la figura 5.61 se representa un transformador que está siendo alimentado por una fuente de corriente alterna (CA):

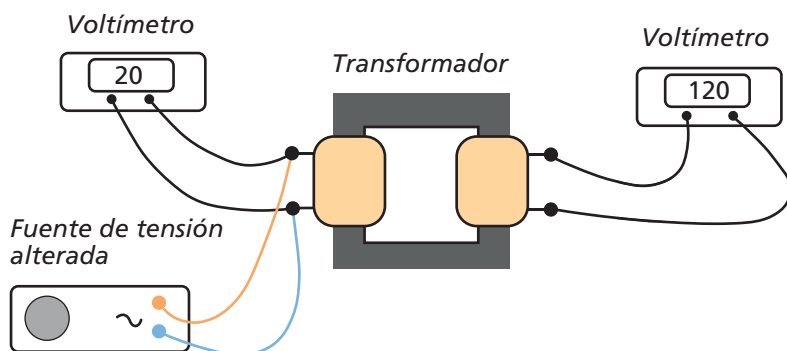


Fig. 5.61

- Identifica en ella la bobina primaria y la secundaria. Argumenta.
 - El transformador representado, ¿es elevador o reductor? Explica tu respuesta.
 - Si la bobina secundaria está construida sobre la base de 1 000 espiras de alambre de cobre, ¿cuántas espiras contiene la bobina primaria?
 - Relaciona tres aplicaciones posibles del transformador aquí mostrado.
15. Una espira rectangular gira con una frecuencia constante dentro de un campo magnético uniforme de inducción B (figura 5.62). Conteste:

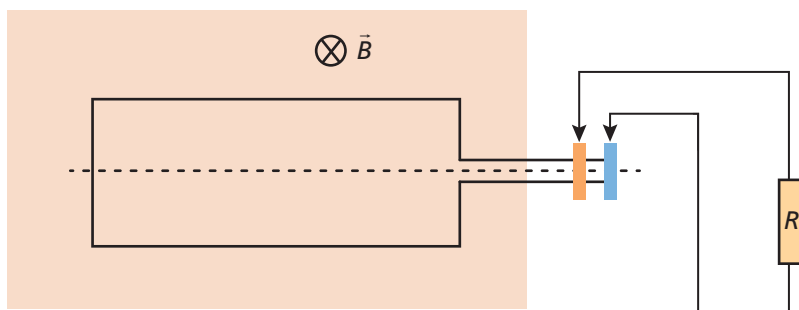


Fig. 5.62

- El dispositivo aquí esquematizado, ¿es un motor o un generador? Explica tu respuesta.
- Explica brevemente su funcionamiento.
- La corriente obtenida en la resistencia se corresponde con una señal de corriente directa (CD) o de corriente alterna (CA).

d) La *fem* que se genera en la espira estará dada por la siguiente ecuación:

- $\varepsilon = 100 \text{ V}$
- $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin 2\pi ft$
- $\varepsilon = 2\pi ft$

16. Un avión vuela horizontalmente con una velocidad de módulo 900 km/h. Halla la diferencia de potencial aparecida entre los extremos de sus alas si el valor de la componente vertical del vector inducción magnética del campo magnético terrestre es $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y la longitud de sus alas de 12 m.
17. ¿Cuál es la inducción de un campo magnético si un conductor de longitud 50 cm se mueve en él con una velocidad de 10 m/s, perpendicular a las líneas de inducción, produciendo una *fem* de inducción de 1,5 V.
18. Un conductor se desplaza con una velocidad de 6,0 m/s perpendicularmente a las líneas de inducción de un campo magnético. Como resultado de esto, se genera en el conductor una *fem* de inducción $\varepsilon_i = 1,44 \text{ V}$. La longitud del conductor es de 1,8 m. Calcula la inducción magnética del campo. Confecciona un esquema del problema e indica la dirección y sentido de $\vec{B}$, así como la polaridad de ε_i en el conductor.
19. ¿Cuál será la inductancia L de una bobina sin núcleo, con 13 espiras, si el área de su sección transversal es de $0,002 \text{ m}^2$ y su longitud de 0,6 m?
20. Calcula la *fem* inducida ε_i y la inductancia L de un solenoide de 0,25 m de longitud, 4 000 espiras y $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ de sección transversal, al que se le ha variado uniformemente la intensidad de la corriente desde 2 A hasta 30 A en 0,02 s.
21. Determina la inductancia de un solenoide que tiene un devanado de 150 espiras si al variar la intensidad de la corriente que pasa por él en 30 mA, su flujo cambia en 0,05 Wb.
22. Calcula la energía del campo magnético que adquiere una bobina de inducción $L = 0,5 \text{ H}$, para una corriente que varió uniformemente desde 0 hasta 2,0 A en 0,5 s.
23. En una bobina con una inductancia de 0,15 H y una resistencia r pequeña, existe una corriente de 4,0 A. En paralelo con la bobina se conecta una resistencia $R \gg r$, ¿qué cantidad de calor se desprende de la bobina y de la resistencia después de una rápida desconexión de la fuente de corriente?

CAPÍTULO 6

Oscilaciones electromagnéticas

La invención y desarrollo de las máquinas utilizadas para la producción de electricidad, la generación y recepción de las señales de radio, televisión y telefonía móvil, el diagnóstico y tratamiento de muchas enfermedades, la utilización de la cocción de alimentos mediante los hornos de microondas (figura 6.1), son solo algunos ejemplos de las múltiples aplicaciones relacionadas con las oscilaciones electromagnéticas en la ciencia, la tecnología y la vida cotidiana. Por otra parte, el estudio de las oscilaciones electromagnéticas resulta también esencial para abordar los fenómenos relacionados con las ondas electromagnéticas y entre ellos, los fenómenos luminosos.



Fig. 6.1 Imágenes de algunas de las aplicaciones en que está presente el fenómeno de las oscilaciones electromagnéticas

En la actualidad, el estudio de las oscilaciones electromagnéticas es uno de los temas más fascinantes y fundamentales en el campo de la física. Desde el inicio de la ciencia moderna los científicos han estudiado los fenómenos relacionados con estas oscilaciones y utilizado sus descubrimientos para revolucionar la tecnología moderna. Estudiar las oscilaciones electromagnéticas no solo es importante para comprender cómo funciona

el mundo en que vivimos, sino también para desarrollar tecnologías que tienen un impacto significativo en nuestra vida diaria.

Este capítulo está dirigido a ampliar y profundizar en el estudio de las oscilaciones de carácter electromagnético y en particular, en los llamados circuitos de corriente alterna.

6.1 Oscilaciones electromagnéticas libres. Circuito L-C

Al estudiar los generadores de corriente (epígrafe 5.3) se obtuvo que la tensión inducida varía periódicamente en correspondencia con la ecuación:

$$U_i = U_{i_{\max}} \sin \omega t$$

Como conocemos, esto significa que la tensión inducida oscila armónicamente.

En general, a las oscilaciones de la carga, la intensidad de la corriente, la tensión o cualquier otra magnitud de carácter electromagnético se les denomina **oscilaciones electromagnéticas**.

Analicemos el circuito representado en la figura 6.2 a. Cuando el interruptor está en la posición 1, algún tiempo después, el capacitor de capacidad C adquiere una carga $Q = CU_c$, donde $U_c = \varepsilon$ es la tensión en las placas del condensador (figura 6.2 b)

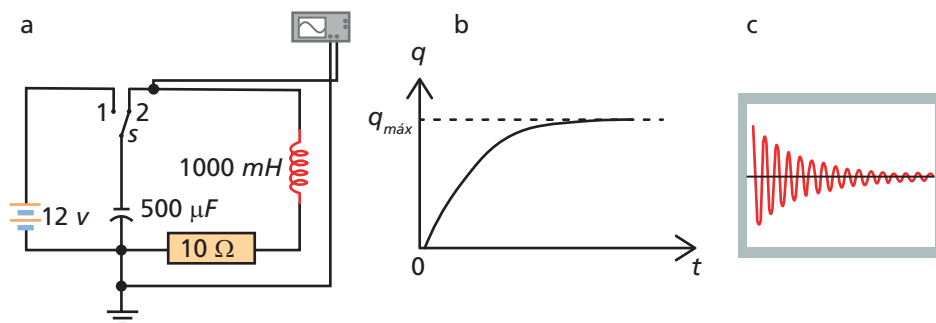


Fig. 6.2 a) Circuito LC; b) Proceso de carga del capacitor cuando el interruptor está en la posición 1; c) Imagen del registro de las oscilaciones de tensión en la pantalla del analizador de señales

En la imagen ampliada de la pantalla del analizador electrónico de señales (osciloscopio o computadora), conectado a las placas del capacitor, podemos observar cómo varía la tensión entre las placas al conmutar el interruptor S a la posición 2 (figura 6.2 c). Para determinados valores de

la capacidad C , la inductancia L y la resistencia R , en la figura 6.3 se representa la gráfica obtenida en el analizador de señales. En esta gráfica se puede apreciar que la tensión oscila de manera *aproximadamente* periódica y que su amplitud disminuye desde el valor máximo $U_c = \varepsilon$ hasta que prácticamente se anula.

Tenemos, pues, que, en la parte del circuito compuesta por el resistor, la bobina y el capacitor (circuito que en lo adelante denominaremos RLC), se producen **oscilaciones electromagnéticas amortiguadas**.

Como en este caso ningún agente externo interviene suministrándole energía al circuito, estas oscilaciones se denominan **oscilaciones electromagnéticas libres**. A este tipo de oscilaciones es frecuente llamarles **oscilaciones electromagnéticas libres amortiguadas**, para diferenciarlas del caso en que el amortiguamiento pueda no ser considerado como veremos a continuación.

A medida que se disminuye la resistencia del resistor R , la amplitud de las oscilaciones de la tensión U , y de la carga Q (o sea, del valor máximo que pueden tomar estas magnitudes), disminuye cada vez menos y la periodicidad de las oscilaciones es cada vez más exacta, como se puede apreciar en las gráficas de la figura 6.3.

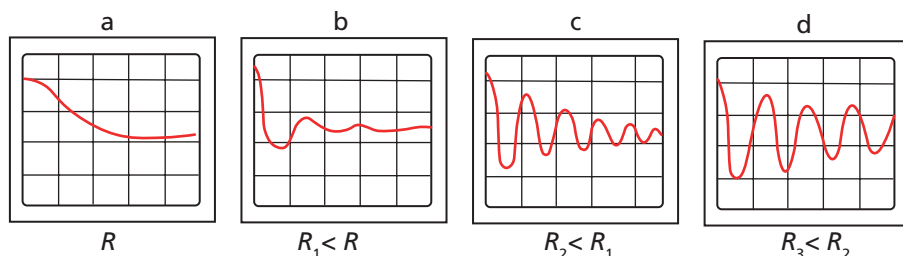


Fig. 6.3 Representación de la forma en que varía la tensión (o la carga) en las placas del capacitor al variar la resistencia del resistor en el circuito

En el caso ideal en que $R = 0$ (no debemos olvidar que tanto los conductores que forman el circuito como los de la bobina tienen resistencia), las oscilaciones no se amortiguarán, y el oscilograma tendrá la forma que se representa en la figura 6.4. En la práctica esto se obtiene con muy buena aproximación para valores muy pequeños de la resistencia del circuito e intervalos cortos de tiempo.

Antes de iniciar el estudio cuantitativo de este fenómeno analicemos, desde el punto de vista físico, cómo se producen las oscilaciones electromagnéticas libres.

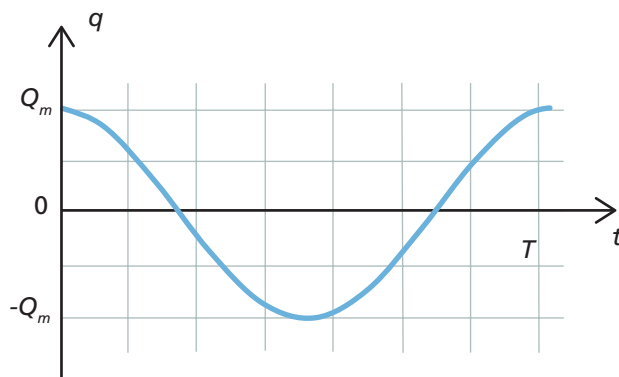


Fig. 6.4 Gráfica de las oscilaciones de la carga eléctrica de un circuito oscilante LC

Comencemos nuestro estudio por el caso más simple: $R = 0$. Consideraremos que el circuito está formado solamente por una bobina ideal (de resistencia despreciable) y un capacitor. Este circuito, en lo adelante, será denominado **circuito LC**.

En el instante inicial, cuando el interruptor S del circuito mostrado en la figura 6.2 se lleva a la posición 2, toda la energía del sistema se encuentra en el campo electrostático del capacitor. Recuerda que en ese instante aún no circula corriente por el circuito, pues en la bobina aparece una fuerza electromotriz autoinducida que se opone a su circulación (figura 6.5 a). La corriente, a partir de este instante, comienza a aumentar paulatinamente y parte de la energía se transfiere al campo magnético de la bobina (figura 6.5 b).

Según se descarga el capacitor, disminuye la tensión entre sus placas y el incremento de la corriente es cada vez más lento. Por lo tanto, la fuerza electromotriz va disminuyendo.

Cuando el capacitor se ha descargado totalmente la energía del sistema se encuentra en el campo magnético de la bobina (figura 6.5 c). La corriente cesa de incrementarse y de no existir la bobina disminuiría rápidamente hasta anularse. Pero en estas circunstancias en la bobina aparece una fuerza electromotriz autoinducida con sentido contrario a la inicial, de forma que se opone al cese de la corriente. Como consecuencia el capacitor comienza a cargarse nuevamente, esta vez con polaridad contraria a la inicial. Según su carga va aumentando, la corriente comienza a disminuir (figura 6.5 d).

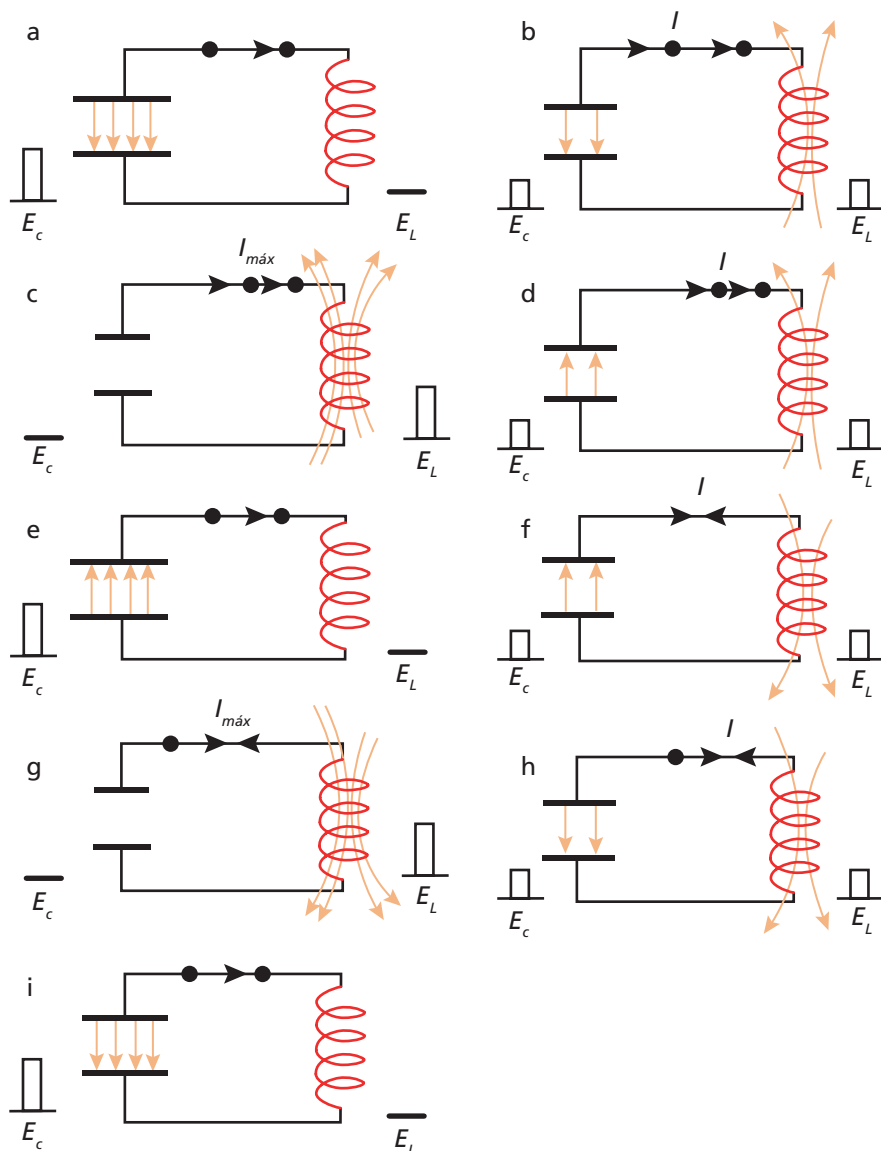


Fig. 6.5 Representación esquemática del proceso de carga y descarga en un circuito LC

Cuando el capacitor se ha vuelto a cargar totalmente, es decir, cuando toda la energía del campo magnético de la bobina se ha transferido nuevamente al campo electrostático del capacitor, la corriente se anula (figura 6.5 e). A partir de ese instante el proceso se repite invirtiéndose el sentido de la corriente (figura 6.5 g, h, i). Después, todo el ciclo vuelve a comenzar nuevamente.

En las condiciones reales, durante cada ciclo parte de la energía se disipa en forma de calor en el resistor y la amplitud de las oscilaciones disminuye hasta que estas cesan. Si la resistencia tiene un valor lo suficientemente elevado ni siquiera se llegan a producir oscilaciones, pues la energía se disipa muy rápidamente (figura 6.6).

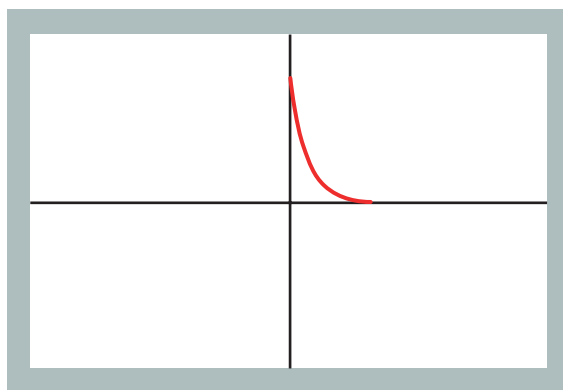


Fig. 6.6 Forma de la señal registrada en el analizador cuando la resistencia del resistor de la figura 6.2 es de $0,5 \text{ k}\Omega$

Se puede comprobar que la representación gráfica de las oscilaciones registradas, que se muestra en la figura 6.4, se describe por la ecuación:

$$q = Q_m \cos \omega t \quad 6.1$$

$Q_m = C\varepsilon$ Donde C es la capacidad del capacitor y ε es la diferencia de potencial entre sus placas.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ω es la frecuencia cíclica o angular de las oscilaciones y T es el periodo de las oscilaciones.

La ecuación para la intensidad de la corriente se puede obtener a partir de la analogía matemática que existe entre las ecuaciones de las oscilaciones armónicas de cualquier naturaleza. La definición de intensidad de corriente se expresa en forma matemática por la ecuación:

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

Esta ecuación es análoga a la que define el valor de la velocidad de un cuerpo:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Por lo tanto, si cuando $x = x_m \cos \omega t$ se tiene que

$$v = -v_m \sin \omega t = v_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Entonces, para la intensidad de la corriente se tendrá que:

$$i = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad 6.2$$

Donde $I_m = \omega Q_m$

La gráfica de la variación de la corriente en el circuito tendrá entonces la forma mostrada en la figura 6.7.

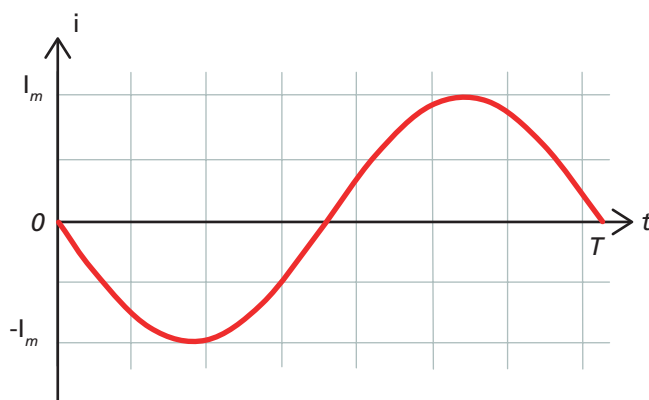


Fig. 6.7 Gráfica de las oscilaciones de la intensidad de la corriente en un circuito oscilante LC

Comparando las ecuaciones 6.1 y 6.2 se puede apreciar que las oscilaciones de corriente en el circuito tienen un adelanto de fase de $\pi/2$ a las oscilaciones de carga en el capacitor.

Por otra parte, como para los sistemas oscilatorios mecánicos, por ejemplo, el sistema cuerpo resorte se tiene que la energía mecánica del sistema es:

$$E_m = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2 \quad 6.3$$

Y en el caso de un sistema oscilatorio electromagnético (circuito LC) se tiene que:

$$E = \frac{1}{2} \frac{1}{C} q^2 + \frac{1}{2} L i^2 \quad 6.4$$

Donde el primer término de esta ecuación es la energía en el campo electrostático del condensador y el segundo la energía en el campo magnético de la bobina.

Si comparamos las ecuaciones 6.3 y 6.4, se puede apreciar que en las oscilaciones electromagnéticas las magnitudes $1/C$ y L , son respectivamente análogas a las magnitudes k y m en las oscilaciones mecánicas.

Entonces, como en las oscilaciones mecánicas $\omega = \sqrt{k/m}$, para las oscilaciones electromagnéticas se tendrá que:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad 6.5$$

Sustituyendo en la ecuación 6.5 el valor de $\omega = 2\pi/T$ y despejando T obtiene que el periodo de las oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC está dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad 6.6$$

Y la frecuencia:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad 6.7$$

En la tabla 6.1 se resumen las analogías entre las magnitudes que describen las oscilaciones mecánicas y las oscilaciones electromagnéticas.

Tabla 6.1

Magnitudes	Sistema oscilatorio mecánico (cuerpo-resorte)	Sistema oscilatorio electromagnético (circuito LC)
Posición o elongación y carga eléctrica	x	q
Velocidad e intensidad de la corriente	v	i
Masa e inductancia de la bobina	m	L
Constante elástica y capacidad eléctrica	k	$\frac{1}{C}$

Posición y carga	$x = A \cos(\omega t)$	$q = Q_{\text{máx.}} \cos(\omega t)$
Velocidad y corriente	$v_x = -A \omega \sin(\omega t)$	$i = -Q_{\text{máx.}} \sin(\omega t)$
Aceleración y rapidez con que varía la corriente	$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = -A \omega_0^2 \cos(\omega t)$	$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -Q_{\text{máx.}} \omega_0^2 \cos(\omega t)$
Frecuencia cíclica o angular	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$
Período de las oscilaciones	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	$T = 2\pi \sqrt{LC}$
Frecuencia	$\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}}$	$\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
Energía	$E_c = \frac{mv^2}{2}, E_{pe} = \frac{kx^2}{2}$	$E_L = \frac{LI^2}{2}, E_e = \frac{q^2}{2C}$

Problema resuelto 6.1

Un circuito oscilante (figura 6.8) compuesto por un capacitor de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ F}$ se conecta en serie a una bobina de inductancia $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ H}$. Inicialmente la intensidad de la corriente en la bobina tiene su valor máximo de $0,5 \text{ A}$.

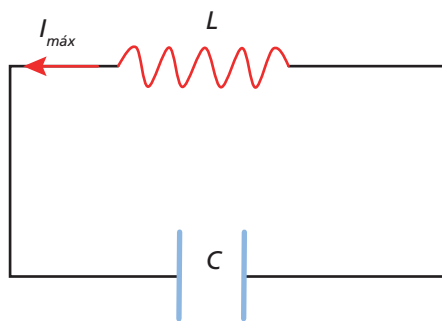


Fig. 6.8

- Determina la frecuencia cíclica y el periodo de las oscilaciones del circuito.
- Escribe las ecuaciones de las oscilaciones para la corriente en la bobina y la carga del capacitor.
- Representa las gráficas de la corriente en el circuito $i = f(t)$ y la carga del capacitor $q = f(t)$.
- Representa las gráficas de la energía del campo magnético en la bobina $E_L = f(t)$ y la energía del campo eléctrico en el capacitor $E_C = f(t)$.

Solución:

La frecuencia cíclica o angular se puede calcular directamente, a partir de los datos, mediante la ecuación:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ F} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ H}}}$$

$$\omega = 500 \text{ rad/s}$$

El periodo se puede calcular ahora a partir de la ecuación:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Sustituyendo el valor de la frecuencia cíclica, el resultado es:

$$T = 1,26 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

Para $t = 0$, la corriente es máxima la ecuación $i = f(t)$ será:

$$i = I_{\text{máx}} \cos(\omega t) (\text{A}; \text{s}).$$

Al sustituir los valores de la corriente máxima y de la frecuencia cíclica de las oscilaciones queda como:

$$i = 0,5 \cos(500 t) (\text{A}; \text{s})$$

Las oscilaciones de la corriente se adelantan en $\frac{\pi}{2}$ rad a la carga o la carga se atrasa en $\frac{\pi}{2}$ rad respecto a la corriente:

Por tanto, $\cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) = \text{sen}(\omega_0 t)$, la ecuación de las oscilaciones de la carga eléctrica será:

$$q = Q_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t)$$

$$Q_{\text{máx.}} = \frac{I_{\text{máx.}}}{\omega}$$

$$Q_{\text{máx.}} = \frac{0,5 \text{ A}}{500 \text{ rad/s}}$$

$$Q_{\text{máx}} = 0,001 \text{ C}$$

$$q = 0,001 \text{sen}(500 t) (\text{C}; \text{s})$$

En correspondencia con las ecuaciones planteadas en el inciso b, las gráficas de las oscilaciones de la carga y la corriente (figuras 6.9 y 6.10) tendrán la forma:

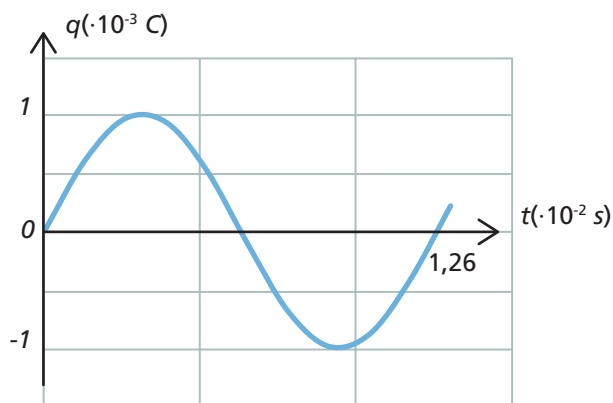


Fig. 6.9 Oscilaciones de la carga

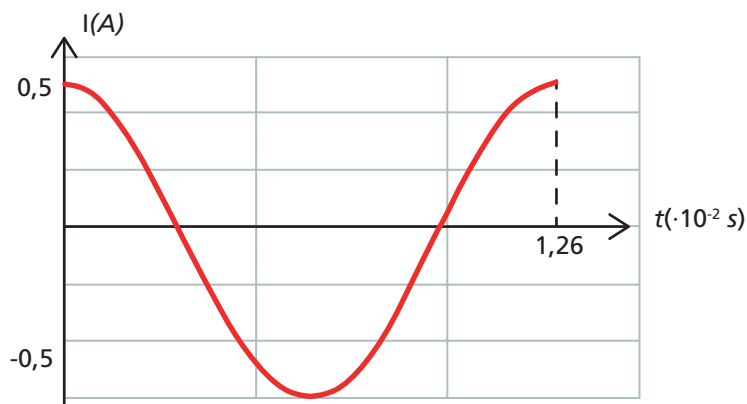


Fig. 6.10 Oscilaciones de la corriente

Para construir las gráficas solicitadas hay que conocer la forma de las ecuaciones para la energía en el capacitor E_C , así como la que corresponde al inductor E_L .

Conocemos que:

$$E_C = \frac{q^2}{2C} \text{ y } E_L = \frac{Li^2}{2}$$

Entonces, al sustituir las ecuaciones para la carga eléctrica q y para la corriente instantánea i , encontradas en el inciso b, se obtiene que:

$$E_C = \frac{Q_{\max}^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t) \quad 6.8$$

$$E_L = \frac{LI_{\max}^2}{2} \cos^2(\omega_0 t) \quad 6.9$$

Además, como para la energía total se tiene que $E_T = E_C + E_L$, su valor se puede determinar calculando el valor máximo de la energía del campo eléctrico o el de la energía del campo magnético. Por lo tanto:

$$E_T = E_{C_{max.}} = \frac{Q_{max.}^2}{2C}$$

$$E_T = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Entonces, las gráficas (figura 6.11) tendrán la forma siguiente:

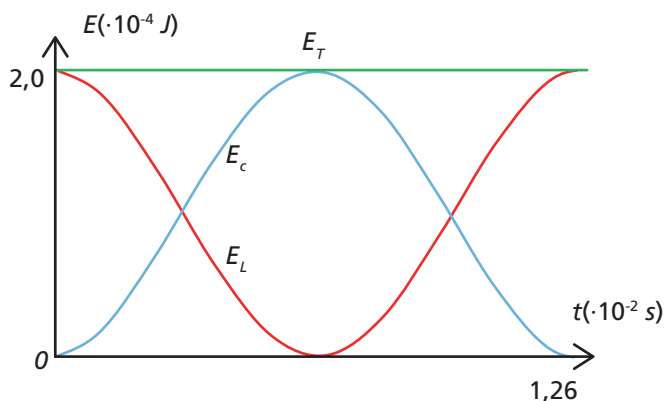


Fig. 6.11

Comprueba tus conocimientos

1. Qué diferencia de fase existe entre las oscilaciones de carga y las de la intensidad de la corriente en un circuito LC?
2. Un circuito oscilante LC, tiene una capacidad de $4,0 \cdot 10^{-8} \text{ F}$ y una inductancia de valor $1,0 \text{ H}$.
 - a) Determina la frecuencia cíclica propia y el periodo de las oscilaciones de la carga en el circuito.
 - b) Determina la carga máxima del capacitor, si la tensión máxima entre las placas es de $4,0 \text{ V}$.
 - c) Escribe la ecuación de las oscilaciones armónicas de la carga eléctrica en el circuito.
3. La carga eléctrica almacenada en las placas de un capacitor oscila según la ecuación $q = -3,2 \cdot 10^{-10} \text{ sen}(4\pi t)(\text{C}; \text{s})$.
 - a) ¿Cuál es el valor de la carga máxima que almacena el capacitor?
 - b) ¿Cuál es la frecuencia cíclica propia de las oscilaciones de la carga?

- c) Si la inductancia de la bobina es 1,0 H, determina el valor de la capacidad del capacitor.
 - d) Calcula la frecuencia de las oscilaciones.
 - e) ¿En cuántas veces varía el período de las oscilaciones electromagnéticas del circuito si el capacitor es sustituido por otro de capacidad tres veces mayor?
4. Di como varía la frecuencia de un circuito LC, si:
- a) su capacidad se triplica;
 - b) su inductancia se reduce a la mitad.

6.2 Oscilaciones electromagnéticas forzadas. Corriente alterna

Si se desean mantener las oscilaciones en un circuito oscilante real es preciso que se restituya la energía disipada a causa de la resistencia de los conductores que forman parte del circuito mediante un agente externo. En este caso estamos en presencia de **oscilaciones electromagnéticas forzadas**.

El caso más sencillo de oscilaciones forzadas en un circuito se tiene cuando se le suministra energía a un circuito RLC, mediante una fuente cuya tensión o fuerza electromotriz varía de forma armónica. En estas condiciones tanto la intensidad de la corriente como las diferencias de potencial en todos los componentes del circuito (y también la carga en el capacitor), variarán en función del tiempo según una función seno o coseno, por lo que cambiarán periódicamente de valor y signo. El cambio de signo significa que se invierte el sentido de la corriente y de la polaridad en cada componente. Dadas estas características, a la corriente que circula por un circuito, bajo este tipo de régimen forzado, se le denomina **corriente alterna sinusoidal**.

Aunque existen y tienen múltiples aplicaciones las corrientes alternas no sinusoidales, aquí limitaremos nuestro estudio a un análisis elemental del comportamiento de los circuitos por los cuales la corriente alterna sea sinusoidal. En lo adelante los denominaremos simplemente como circuitos de corriente alterna y a otros tipos de corrientes alternas nos referiremos solo cuando sea necesario.

La práctica confirma que en los circuitos de corriente alterna tanto la intensidad de la corriente como las tensiones, en los componentes que lo

forman, varían de forma armónica, pero con cierta diferencia de fase a excepción del caso del resistor (figura 6.12).

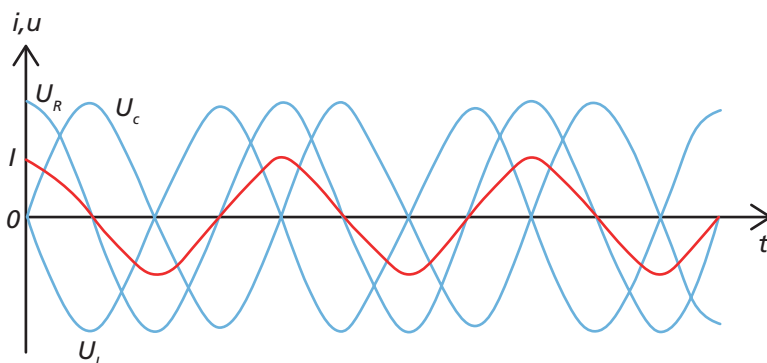


Fig. 6.12 Oscilaciones de la tensión y la corriente en el resistor

Para comprender el comportamiento de los circuitos de corriente alterna, es fundamental conocer por qué se producen estas diferencias de fase entre las oscilaciones de corriente y las de tensión.

Este estudio se puede realizar de manera sencilla si se analizan por separado los comportamientos de los resistores (circuito R), los capacitores (circuito C) y las bobinas (circuito L) cuando son alimentados por fuentes de fuerza electromotriz alterna y después abordar el estudio del comportamiento del circuito integrado por los tres elementos (circuito RLC).

Circuito R

En el caso de un circuito R (figura 6.13) alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u(t) = U_m \cos \omega t$ (V;s) de manera que la corriente que circula por el resistor será:

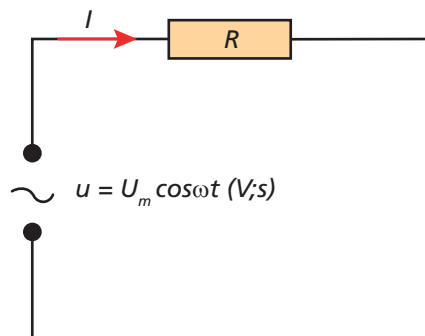


Fig. 6.13 Esquema del circuito R

Según la ley de Ohm $i_{(t)} = \frac{u_{(t)}}{R}$

$$i_{(t)} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t \quad 6.10$$

Por lo tanto, en este circuito las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión se encuentran en fase (figura 6.14).

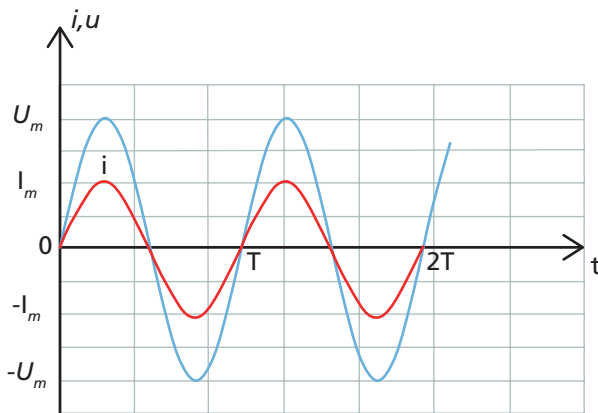


Fig. 6.14 En un circuito R las oscilaciones de tensión y corriente están en fase

Otra característica importante del circuito R es que en él tiene lugar una transformación irreversible de la energía de la corriente eléctrica en energía interna del resistor. En el resistor se disipa una cantidad de energía P (potencia) por unidad de tiempo que se puede calcular, para cada instante, utilizando la ecuación:

$$P = i \cdot u \quad 6.11$$

Sustituyendo 6.10 en 6.11:

$$P = I_m \cos(\omega t) U_m \cos(\omega t) \quad P = I_m U_m \cos^2(\omega t) \quad P = P_m \cos^2(\omega t)$$

Pero $U_m = I_m R$

$$P = I_m^2 R \cos^2 \omega t \quad 6.12$$

En la figura 6.15 se representa la gráfica de la potencia en función de tiempo; a partir de esta se puede apreciar que la energía disipada durante un período de la corriente alterna es igual al área del rectángulo cuya base es igual al período T y su altura la mitad de la potencia máxima P . Por lo tanto, la energía disipada en cada período es:

$$E = \frac{1}{2} P T$$

$$E = \frac{1}{2} I_m^2 R T$$

Y la potencia media disipada será:

$$\bar{P} = \frac{E}{T}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

6.13

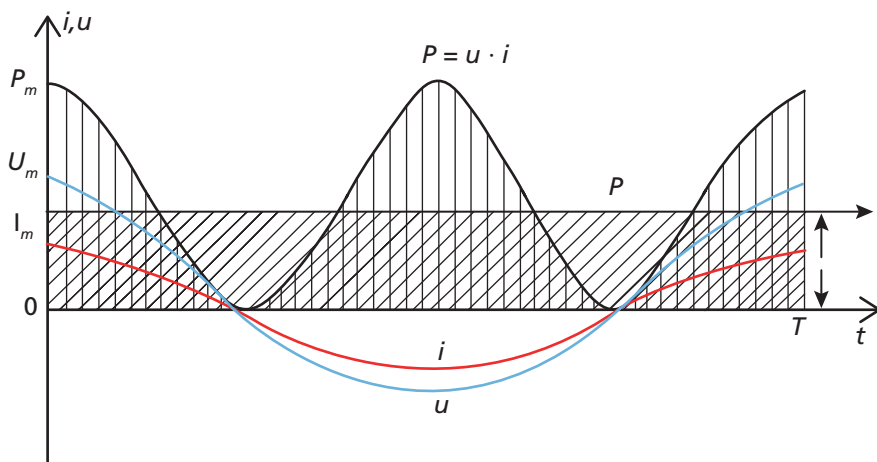


Fig. 6.15 Gráfica de la potencia en función del tiempo

Comparando la ecuación 6.13 con la que se utiliza para calcular la potencia disipada en el resistor cuando la corriente es directa $P = IR$, se obtiene que:

$$\frac{1}{2} I_m^2 R = I^2 R$$

Dividiendo toda la expresión por R y extrayendo raíz cuadrada, se tiene que:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Por consiguiente, una corriente alterna de amplitud I_m disipa la misma cantidad de energía que una corriente directa de intensidad $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$. A este valor de corriente se le llama **corriente eficaz** o **efectiva** I_e , por lo tanto:

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad 6.14$$

Como, en general $U = IR$ para la tensión eficaz se tendrá que:

$$U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad 6.15$$

Circuito C

Analicemos primero el comportamiento de un circuito C (figura 6.16) de forma cualitativa y experimental.

Conocemos que si el circuito representado en la figura 6.16 fuera alimentado por una fuente de corriente directa por él solo circularía corriente durante un pequeño intervalo de tiempo, hasta que se cargue el capacitor, pues el capacitor tiene entre sus placas un material dieléctrico y no permite el paso de la corriente.

Sin embargo, la corriente alterna puede circular por un circuito en el cual se encuentra un capacitor. Esto se verifica experimentalmente de manera directa mediante el amperímetro colocado en el circuito representado en la figura 6.16.

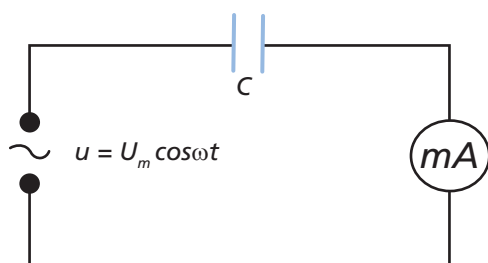


Fig. 6.16 Circuito C

La explicación física de cómo puede circular la corriente alterna por el circuito, a pesar de que entre las placas del capacitor lo que hay es un dieléctrico, es muy sencilla. Lo que sucede es que el capacitor se carga y se descarga periódicamente bajo la acción de la tensión alterna.

También se puede comprobar que mientras mayor sea la frecuencia del generador o la capacidad del capacitor mayor será el valor de la intensidad de la corriente indicada por el amperímetro.

Analicemos ahora como varía en el tiempo la intensidad de la corriente en este tipo de circuito. Si el circuito está alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u = U_m \cos \omega t$, se tendrá que, para cualquier instante:

$$U_m \cos \omega t = \frac{q}{C}$$

Despejando q :

$$q = U_m C \cos \omega t$$

Por lo tanto, para la intensidad de la corriente se obtiene que:

$$i = -\omega U_m C \sin \omega t \quad 6.16$$

$$\text{Donde } I_m = \omega U_m C \quad 6.17$$

La ecuación 6.16 se puede también escribir como:

$$i = I_m \cos(\omega t + \pi/2) \quad 6.18$$

Comparando la ecuación de la tensión que alimenta al circuito (o lo que es lo mismo, de la carga del capacitor) con la ecuación 6.18, encontramos que, en un circuito C, las oscilaciones de la intensidad de la corriente están adelantadas a la de la tensión en $\pi/2$ (figura 6.17)

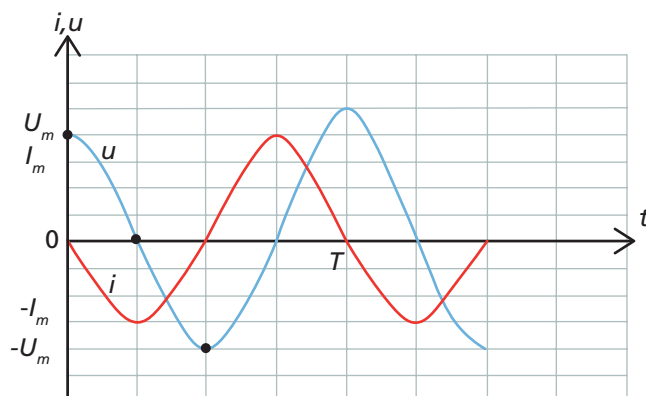


Fig. 6.17 Las oscilaciones de corriente en el circuito C se adelantan en $\pi/2$ a las de la tensión en el capacitor

Esta diferencia de fase entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión en un circuito C. puede ser observada experimentalmente introduciendo un resistor en el circuito C y registrando con un osciloscopio las variaciones de la tensión en el capacitor y el resistor, pues las variaciones de la tensión en el resistor están en fase con las de la intensidad de la corriente.

El significado físico de esta diferencia de fases se puede interpretar de la forma siguiente; en el instante en que el capacitor está completamente cargado y, por lo tanto, la tensión entre sus placas alcanza el valor máximo posible (con polaridad contraria a la de la fuente) el valor de la intensidad de la corriente se anula. Por otra parte, cuando el capacitor está completamente descargado y como con secuencia la tensión entre sus placas es cero, no ofrece ninguna oposición al establecimiento de la corriente y la intensidad de esta alcanza el valor máximo posible.

Como para un circuito C se cumple que (ecuación 6.17):

$$I_m = \omega U_m C$$

Entonces, la oposición que este circuito ofrece al paso de la corriente alterna será $1/\omega C$. A esta magnitud se le denomina **reactancia capacitiva** si se simboliza por la letra X_c , es decir:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad 6.19$$

Esta dependencia entre la reactancia capacitiva con la frecuencia y la capacidad, se puede comprobar experimentalmente variando la frecuencia del generador para capacitores de diferente capacidad.

Se debe considerar que en el caso de un circuito C la oposición al paso de la corriente alterna no tiene el mismo carácter que en caso de los resistores, en los cuales esta oposición, que en lo adelante llamaremos **resistencia activa**, no está asociada a la disipación de energía mediante calor. Como se puede apreciar en la figura 6.18 la potencia media entregada por el generador (o disipada por el circuito) es nula. Este comportamiento energético del circuito se debe a que en cada periodo el capacitor recibe energía durante el proceso de carga y la restituye durante la descarga.

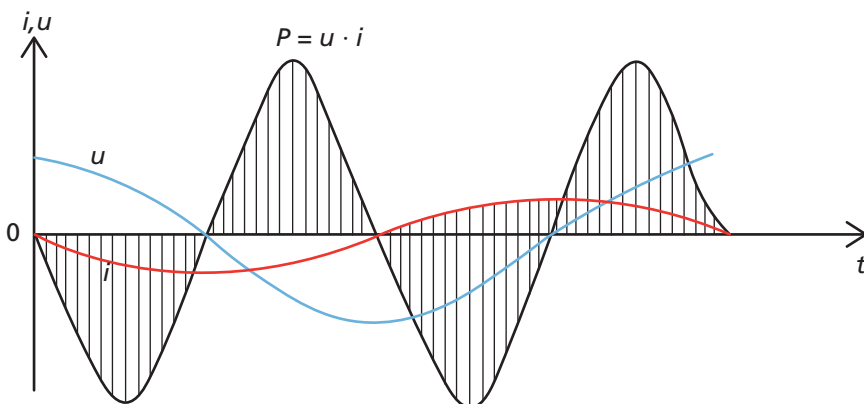


Fig. 6.18 Nota que la potencia en una oscilación completa es nula: durante medio periodo es positiva y durante medio periodo es negativa

Circuito L

Al igual que en el caso anterior, comencemos por un análisis cualitativo y experimental del comportamiento de un circuito L (figura 6.19)

Si este circuito fuera alimentado mediante una fuente de corriente directa el valor de la intensidad de la corriente solo dependería del

valor de la tensión aplicada y de la resistencia activa de los conductores que conforman la bobina. Pero si la fuente de alimentación es alterna y genera una tensión de igual valor eficaz, la lectura del amperímetro (es decir, el valor de la corriente eficaz) es menor. También se puede comprobar experimentalmente que a medida que se aumenta la frecuencia o la inductancia de la bobina el valor de la intensidad de la corriente decrece.

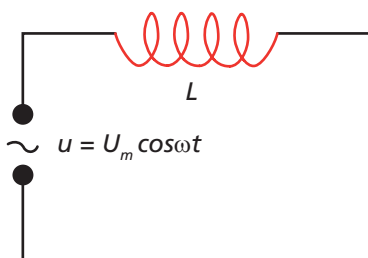


Fig. 6.19 Circuito L

Este comportamiento del circuito L cuando es alimentado por una fuente de tensión alterna, se puede interpretar físicamente si recordamos que, como en este caso, la corriente es variable, el fenómeno de la autoinducción que se produce en la bobina se opone a las variaciones de la corriente en el circuito.

Analicemos ahora como varía la intensidad de la corriente en este tipo de circuito. Si es alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u = U_m \cos \omega t$, se tendrá para cualquier instante que:

$$U_m \cos \omega t = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Dividiendo toda la ecuación entre L y multiplicando y dividiendo por ω^2 , quedará que:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -\frac{\omega^2 U_m \cos \omega t}{\omega^2 L}$$

Como conocemos, si el término $\Delta i / \Delta t$ viene dado por una ecuación de la forma anterior, entonces la ecuación para i será:

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t, \text{ o}$$

$$i = I_m \sin \omega t, \tag{6.20}$$

Donde

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L} \tag{6.21}$$

La ecuación 6.20 se puede escribir como:

$$i = I_m \cos(\omega t - \pi/2) \quad 6.22$$

Podemos concluir entonces que en un circuito L las oscilaciones de la intensidad de la corriente están atrasadas respecto a las de la tensión en $\pi/2$ (figura 6.20).

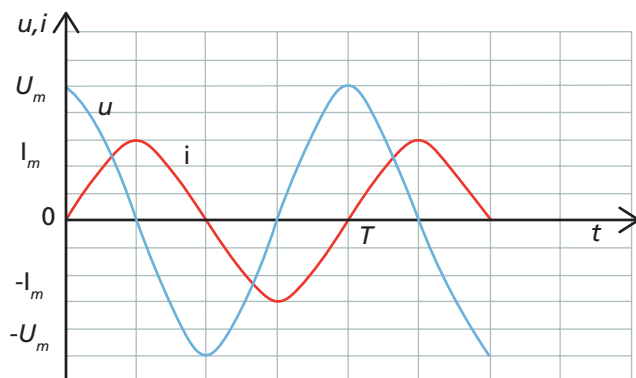


Fig. 6.20 Las oscilaciones de corriente en el circuito L se atrasan en $\pi/2$ a las de la tensión en el inductor

Esta diferencia de fase se debe a que en el instante en que la tensión autoinducida en los extremos de la bobina es máxima, la intensidad de la corriente en el circuito será igual a cero. Por otra parte, en el instante en que la tensión autoinducida se anula, la intensidad de la corriente puede alcanzar su máximo valor.

Esta diferencia de fases entre la tensión y la corriente en el circuito L puede ser comprobada experimentalmente de forma análoga a como se hizo en el caso del circuito C . Basta para ello introducir un resistor en el circuito y obtener los oscilogramas de la tensión en el resistor y en la bobina, pues como conocemos, para el caso del resistor las oscilaciones de la tensión y de la intensidad de la corriente se encuentran en fase.

En el circuito L la oposición que presenta la bobina (ideal) al paso de la corriente está dada por la magnitud ωL , a la que se le denomina **reactancia inductiva** y se simboliza por X_L , de manera que:

$$X_L = \omega L \quad 6.23$$

La dependencia que muestra esta ecuación entre la reactancia inductiva, la frecuencia del generador y la inductancia de la bobina, se puede comprobar mediante un experimento sencillo, variando el valor de la frecuencia para bobinas de inductancia diferentes.

En el caso de un circuito L la naturaleza de la oposición al paso de la corriente alterna tampoco tiene el mismo carácter que en un resistor.

Como se puede apreciar en la figura 6.21, la potencia media entregada por el generador (o disipada en el circuito) en cada periodo es cero. Este comportamiento de un circuito L se puede explicar si recordamos que en la bobina consume energía durante el tiempo que se establece el campo magnético el campo magnético y la restituye durante el tiempo que se anula.

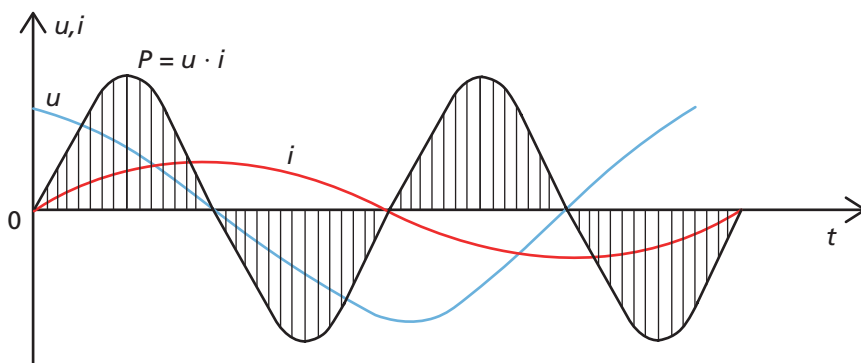


Fig. 6.21 Nota que la potencia en una oscilación completa es nula: durante medio periodo es positiva y durante medio periodo es negativa

Circuito RLC

Consideremos ahora el caso más sencillo de un circuito completo de corriente alterna con sus tres componentes en serie y conectados a una fuente de corriente alterna (figura 6.22). En esta situación la intensidad de la corriente por todos sus componentes es la misma.

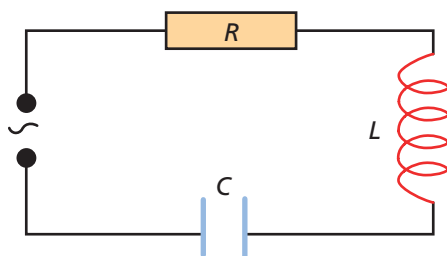


Fig. 6.22 Circuito RLC en serie

Consideremos que la intensidad de la corriente varía de la forma:

$$i = I_m \cos \omega t$$

Entonces, las tensiones en cada uno de los componentes tendrán la forma:

$$U_R = I_m R \cos \omega t \quad 6.24$$

$$U_c = I_m X_c \cos(\omega t - \pi/2) \quad 6.25$$

$$U_L = I_m X_C \cos(\omega t + \pi/2) \quad 6.26$$

En un circuito de CA, a diferencia de los circuitos ideales de CD, la suma de las tensiones en sus componentes no es igual a la tensión o *fem* de la fuente. En este caso la relación que existe entre la tensión o *fem* de la fuente y las tensiones en cada uno de los componentes del circuito (que daremos sin demostración) es:

$$\varepsilon_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2} \quad 6.27$$

De donde se obtiene que:

$$\varepsilon_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad 6.28$$

Si al término $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ lo nombramos **impedancia Z**.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad 6.29$$

Podemos escribir que:

$$\varepsilon_m = I_m Z \quad 6.30$$

Y encontramos que para la corriente:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} \quad 6.31$$

La ecuación 6.31 es la forma simbólica de la **Ley de Ohm para un circuito de CA**. La magnitud Z , que se calcula por la ecuación 6.29, expresa la oposición que ofrece el circuito a la corriente alterna y se denomina impedancia del circuito.

También se puede demostrar que la diferencia de fase entre las oscilaciones de la *fem* de la fuente y de la intensidad de la corriente en el circuito, se puede calcular mediante la ecuación.

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \quad 6.32$$

Como en un circuito RLC, las transformaciones irreversibles de la energía solamente se producen en el resistor R , la potencia disipada en el circuito se puede calcular a partir de la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R \quad 6.33$$

Sustituyendo 6.31 en 6.33 (nota que $I_m^2 = I_m I_m$):

$$P = \frac{1}{2} I_m \frac{\varepsilon}{7} R$$

Expresando ahora 2 como $\sqrt{2}\sqrt{2}$:

$$P = \frac{\varepsilon_m I_m R}{\sqrt{2}\sqrt{2}Z} \quad 6.34$$

Recordando que para los valores eficaces se tiene que:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}} \text{ y } I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Y que $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ (ecuación 6.32)

La ecuación 6.34 se puede escribir como:

$$P = \varepsilon_e I_e \cos\varphi \quad 6.35$$

El término $\cos\varphi$ se denomina factor de potencia y desempeña un papel muy importante en la electrotecnia. Si el desfase es grande $\cos\varphi$ sería muy pequeño y solo una pequeña parte de la energía producida por el generador será aprovechada por el circuito. Esta es una gran desventaja económica, ya que, en esos casos, se pierde una gran cantidad de energía.

En la utilización de la energía eléctrica se producen condiciones no deseables al conectar a la red motores eléctricos, pues sus enrollados tienen una gran inductancia. Para aumentar el $\cos\varphi$ en las redes de circuitos consumidores en las industrias con una gran cantidad de motores eléctricos, se conectan bancos de capacitores denominados compensadores. También es necesario velar porque los motores eléctricos no trabajen sin carga pues esto disminuye el factor de potencia en todo el circuito.

El aumento del $\cos\varphi$ es una importante tarea para la economía ya que permite que los generadores de las centrales eléctricas entreguen el máximo posible de energía, reduciendo considerablemente las pérdidas. Esto se logra con el adecuado diseño de las instalaciones eléctricas. La utilización de instalaciones con un $\cos\varphi < 0,85$ es algo que está prohibido.

Problema resuelto 6.2

La figura 6.23 muestra el diagrama de un circuito RLC, donde la diferencia de potencial a la salida de la fuente varía según la ecuación $u_{ad} = 10\text{sen}(2 \cdot \pi 10^3 t)(\text{V};\text{s})$. Si se conoce que la resistencia del resistor es de 4Ω , la inductancia de la bobina de $\frac{2}{\pi} \cdot 10^{-3} \text{H}$ y que el capacitor tiene una capacidad eléctrica igual a $\frac{1}{2\pi} \cdot 10^{-3} \text{F}$, determina:

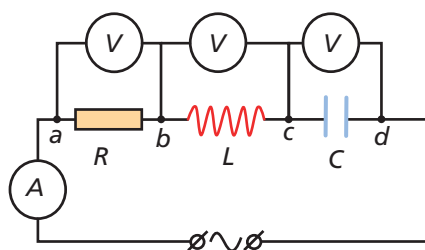


Fig. 6.23

- La frecuencia angular y el período de las oscilaciones en el circuito.
- Las reactancias capacitiva e inductiva del circuito.
- La impedancia del circuito.
- La corriente que indica el amperímetro.
- Los valores de tensión que marcan los voltímetros U_R , U_L y U_C .

Solución:

Según la ecuación $u_{ad} = 10\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 t)$, $\omega = 2\pi \cdot 10^3 \text{ rad/s}$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = \frac{2\pi \text{ rad}}{2\pi \cdot 10^3 \text{ rad/s}} \quad T = 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot 10^{-3} \frac{\text{s}}{\Omega}} \quad X_C = 1,0 \Omega.$$

$$X_L = \omega L \quad X_L = 2\pi \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{s} \quad X_L = 4,0 \Omega.$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} = 5,0 \Omega.$$

$$\text{Teniendo en cuenta que } I_m = \frac{U_m}{Z}, \text{ queda } I_e = \frac{U_m}{Z\sqrt{2}} \quad I_e = \frac{10}{5\sqrt{2}} \quad I_e = \sqrt{2} \text{ A}.$$

Para la resistencia tenemos $U_R = I_e R$ $U_R = 4\sqrt{2} \text{ V}$, para el capacitor

$$U_C = I_e X_C \quad U_C = \sqrt{2} \text{ V} \text{ y para la bobina } U_L = I_e X_L \quad U_L = 4\sqrt{2} \text{ V}.$$

Comprueba tus conocimientos

5. Para el caso de un circuito R:

- Plantea las ecuaciones correspondientes a las oscilaciones de la tensión en los extremos del resistor y de la intensidad de la corriente.

- b) Representa las gráficas correspondientes a las ecuaciones anteriores.
- c) ¿Existe diferencia de fase entre las oscilaciones de tensión y de corriente?
- d) Escribe la ecuación para la potencia disipada en el resistor.

6. ¿A qué se le denomina valor efectivo o eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión?

7. En las redes eléctricas domésticas se utilizan tensiones de 110 V y 220 V. ¿Cuál es la amplitud de las oscilaciones de la tensión en cada uno de estos casos?

8. Para el caso de un circuito C.

- a) Plantea las ecuaciones correspondientes a las oscilaciones de la tensión entre las placas del capacitor y la intensidad de la corriente.
- b) Representa las gráficas correspondientes a las ecuaciones anteriores.
- c) ¿Existe diferencia de fase entre las oscilaciones de corriente y tensión?
- d) Plantea la ecuación para el cálculo de la reactancia capacitiva y explica de qué factores depende; ¿cuál es su significado físico?
- e) Comprueba que la unidad para la reactancia capacitiva es el ohm.
- f) ¿Cómo se interpreta físicamente que para este circuito la potencia disipada sea nula?

9. Responde a los incisos de la pregunta anterior para el caso de un circuito L

10. Si la intensidad de la corriente en un circuito RLC en serie oscila en correspondencia con la ecuación $i = I_m \cos \omega t$, escribe la ecuación correspondiente a las oscilaciones de la tensión en el resistor, en el capacitor y en la bobina.

Repite el análisis anterior si $i = I_m \sin \omega t$

11. Suponiendo que en un circuito RLC en serie $i = I_m \cos \omega t$ representa en un mismo gráfico las curvas correspondientes a las ecuaciones para la variación de la corriente y de la tensión en cada componente.

12. Escribe la ecuación correspondiente a la impedancia de un circuito de CA. Explica cuál es el significado físico de esta magnitud.
13. Plantea la ecuación para la impedancia en los casos de un circuito: RLC, R, C y L.
14. Plantea la expresión matemática de la Ley de Ohm para un circuito de CA. Interpretala.
15. Plantea la ecuación para el cálculo de la potencia en un circuito RLC. ¿Cuál es el significado físico del factor $\cos\varphi$?

6.3 Resonancia de corriente

Según la ecuación 6.31, al variar la frecuencia ω para un valor de resistencia determinado, variará la amplitud de la corriente I_m en el circuito, es decir, la amplitud de la corriente en el circuito es una cierta función de la frecuencia ω . La dependencia de $I_m = f(\omega)$, se muestra en la figura 6.24 para varios valores de la resistencia.

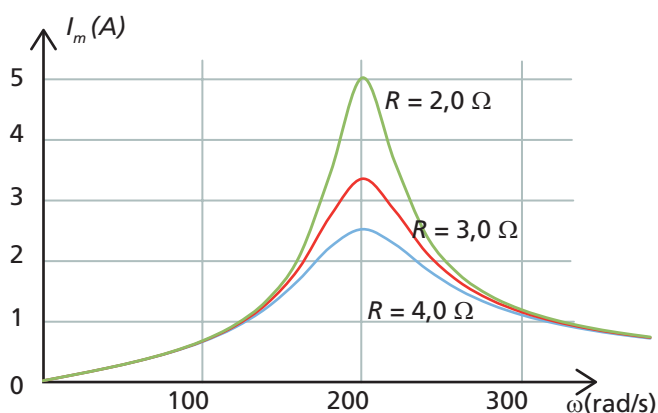


Fig. 6.24 Dependencia de la amplitud de la corriente con la frecuencia del generador de CA. El valor máximo se alcanza cuando la frecuencia del generador se iguala a la de las oscilaciones propias del circuito

El análisis de la ecuación 6.31 indica que los valores máximos de la amplitud de corriente, para cada valor de la resistencia del resistor, se alcanzan cuando la impedancia del circuito Z , es mínima. El valor mínimo de Z tiene lugar cuando

$X_L = X_C$, es decir cuando se cumpla que:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

6.36

Despejando ω se obtiene;

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad 6.37$$

Como esta frecuencia (ecuación 6.37) es igual a la frecuencia de las oscilaciones del circuito ideal LC, podemos concluir que si la frecuencia de las oscilaciones del generador coincide con la frecuencia de las oscilaciones libres no amortiguadas del circuito (que llamaremos oscilaciones propias del circuito), la amplitud de la corriente alcanza el máximo valor posible. Este fenómeno recibe el nombre de **resonancia de corriente**.

Bajo las condiciones de la resonancia de corriente el valor máximo de la amplitud de las oscilaciones de la corriente solo está determinado por la resistencia activa del circuito. Mientras menor sea el valor de esta resistencia, mayor será el valor de la amplitud de las oscilaciones (figura 6.24).

Para valores de frecuencia del generador menores que la frecuencia de resonancia, en el circuito RLC, predomina el comportamiento capacitivo y las oscilaciones de la tensión se atrasan con respecto a las oscilaciones de la corriente. Para una frecuencia del generador mayor que la frecuencia de resonancia, la impedancia del circuito vuelve aumentar y predomina el comportamiento inductivo y entonces la tensión se adelanta a la corriente (figura. 6.25).

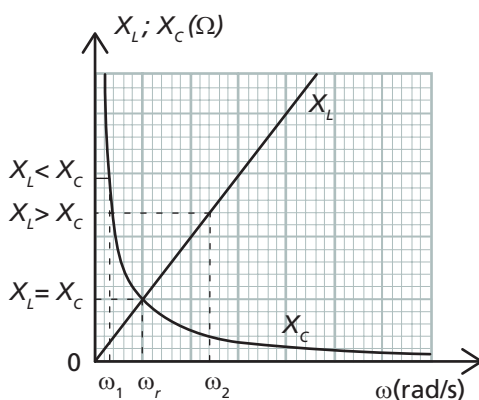


Fig. 6.25 Dependencia de las reactancias del circuito RLC en función de la frecuencia del generador de CA. Nota que las reactancias inductivas y capacitivas son iguales para cierto valor de la frecuencia, es decir, para la frecuencia de resonancia

La resonancia de corriente es un fenómeno análogo a la resonancia de velocidad en el caso de las oscilaciones mecánicas. El fenómeno oscilatorio

electromagnético análogo al de la resonancia de amplitudes, es el de la resonancia de carga o de tensión. En este último caso, la dependencia de la amplitud de la carga o de la diferencia de potencial en las placas del capacitor, de la frecuencia, es diferente (figura 6.26) y se destaca el hecho de que en este caso la frecuencia de resonancia depende de la resistencia del resistor.

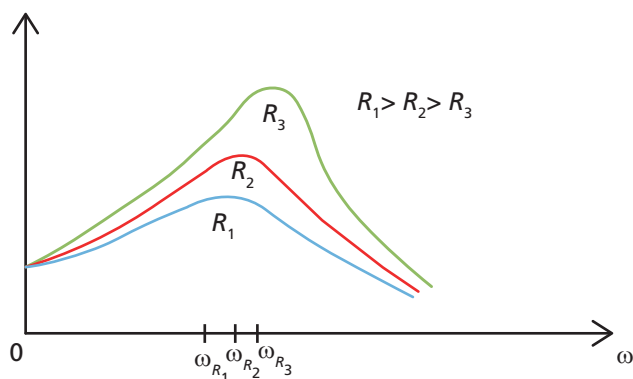


Fig. 6.26 Resonancia de carga. La frecuencia de resonancia depende del valor de la resistencia activa o resistencia del resistor

Una aplicación muy común de la resonancia en los circuitos, es la recepción de las ondas electromagnéticas por el circuito detector de un radio-receptor. La frecuencia cíclica propia del circuito detector $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, se ajusta al variar la capacidad del capacitor variable con el objetivo de poder sintonizar la onda radial que se desea.

Problema resuelto 6.3

Teniendo en cuenta los datos de problema resuelto 6.2, responde:

- ¿Cuál tendría que ser la frecuencia cíclica de las oscilaciones de la diferencia de potencial o tensión, entre los puntos a y d (frecuencia cíclica de la fuente), para que en el circuito ocurra el fenómeno de la resonancia?
- Calcula la impedancia del circuito, cuando ocurre la resonancia.
- Calcula el valor efectivo de la corriente, alcanzado como resultado de la resonancia y compáralo con el obtenido en el inciso d del problema resuelto 6.2. Justifica.

Solución:

- Para que en el circuito ocurra el fenómeno de la resonancia, se tiene que cumplir que la frecuencia cíclica de la fuente (externa) sea igual

a la frecuencia cíclica propia del circuito ($\omega_{\text{ext}} = \omega_0$). Determinando la frecuencia cíclica del circuito, con la ecuación:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Al sustituir los valores $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{\pi} \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot 10^{-3} \text{ F}}}$

$$\omega_{\text{ext.}} = \frac{10^3}{\pi} \text{ rad/s}$$

b) Como $X_L = X_C$, $Z = R$ y $Z = 4,0 \, \Omega$.

c) Para calcular el valor efectivo de la corriente, utilizas la Ley de Ohm para el circuito de CA: $I_e = \frac{U_e}{Z}$.

La tensión efectiva del circuito se determina como $U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ al sustituir en la ecuación de la Ley de Ohm se tiene:

$$I_e = \frac{U_m}{Z\sqrt{2}} \quad I_e = \frac{10 \text{ V}}{4\sqrt{2} \, \Omega} \quad I_e = 1,8 \text{ A}$$

La intensidad de la corriente en el circuito, en resonancia es 2,5 veces mayor que cuando no ocurre y se explica porque la impedancia disminuyó hasta el mínimo valor.

Hora del laboratorio

Práctica de laboratorio 6.1

Tema: estudio de un circuito sencillo de CA

Objetivo: comprobar que la suma de las caídas de tensión en los componentes del circuito solo es igual a la *fem* cuando está en resonancia.

Descripción y tareas:

- Montar un circuito de CA donde aparezcan una fuente, un capacitor, una bobina y una resistencia, todos en serie, comprobar que la suma de la caída de tensión en cada el elemento no es la misma que la de la *fem*.
- Buscar, según los valores de C y L seleccionados, la frecuencia de resonancia del circuito $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, coloca la fuente en esta frecuencia y el circuito estará en resonancia, comprueba que en este caso si se cumple

que la suma de las caídas de tensión en cada elemento, es la tensión medida a la salida de *fem*.

Comprueba tus conocimientos

16. ¿En qué consiste el fenómeno de resonancia de corriente?
17. ¿Cuál es el valor de la impedancia de un circuito en resonancia?
18. Un circuito RLC alimentado por un generador de frecuencia variable se encuentra en resonancia. Analiza si el circuito tiene un comportamiento predominante inductivo o capacitivo al variar la frecuencia de forma que a partir de la de resonancia:
 - a) Aumente
 - b) Disminuya.

6.4 Rectificación de la corriente alterna

Usualmente, en nuestros hogares, en las instalaciones industriales o comerciales y en las instituciones del más diverso tipo se dispone de la electricidad en forma de corriente alterna, que es la generada en las centrales eléctricas de diferentes tipos. Incluso en las instalaciones que se genera corriente continua, generalmente, esta se convierte en alterna para su transmisión.

Por otra parte, en muchos casos es necesario utilizar la corriente continua, por ejemplo, en los procesos electrolíticos para la obtención de metales puros y otras aplicaciones de la electrólisis; en los motores de corriente directa ya que son capaces de regular en forma suave y continua su frecuencia de rotación y desarrollar un gran torque en el momento de ponerse en marcha. La corriente directa también es imprescindible para la alimentación de la mayoría de las instalaciones o dispositivos electrónicos, como los cargadores de baterías de teléfonos celulares, las Laptops, las cajitas para la decodificación de señales digitales de televisión, etcétera.

La corriente directa se puede obtener a partir de la corriente alterna con ayuda de circuitos electrónicos denominados rectificadores.

El funcionamiento de cualquier rectificador está basado en la confección de un circuito que solo permite el paso de la corriente en un sentido.

El dispositivo más utilizado en la actualidad para lograr circuitos con esa característica es el diodo semiconductor. Al conectar un diodo en un circuito alimentado por un generador de corriente alterna (figura 6.27 a) la corriente puede circular por el circuito sólo durante el semiperíodo en

que el diodo está polarizado en directa (figura 6.27 b). Este tipo de circuito rectificador se denomina de media onda. y a la corriente que circula por él, corriente continua pulsante o de media onda.

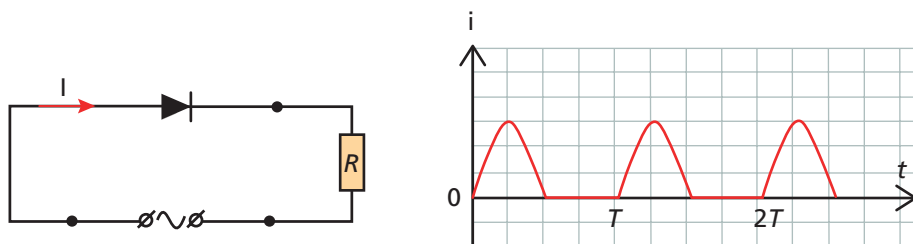


Fig. 6.27 a) Circuito rectificador de media onda, la corriente solo puede circular en el sentido de paso del diodo; b) Forma de la gráfica de la intensidad de la corriente en función del tiempo. Observa que durante el semiperíodo en el diodo no está polarizado en el sentido de paso, la corriente es nula

Mediante un circuito más complejo, compuesto por cuatro diodos (figura 6.28 a) se puede lograr que la corriente circule en un solo sentido todo el tiempo (figura 6.28 b). Analicemos cómo opera este circuito, denominado rectificador de onda completa.

Durante el tiempo en que el borne A del generador es positivo (figura 6.28 a), el borne B es negativo y la corriente solo puede circular por los diodos 1 y 2, que son los que se encuentran polarizados en el sentido de paso o en directa.

Durante el tiempo en que el borne A es negativo y el B positivo, la corriente solo puede circular por los diodos 3 y 4, que son los que, en este caso, se encuentran polarizados en directa. De esta manera, durante todo el tiempo por el resistor de carga R está circulando la corriente en un solo sentido. A esta corriente se acostumbra a llamarle corriente continua pulsante.

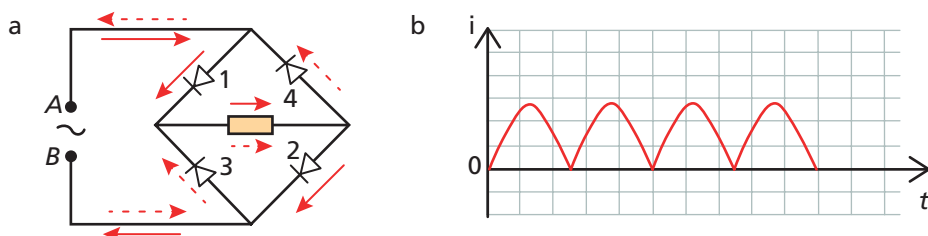


Fig. 6.28 Proceso de rectificar corriente alterna

Tanto en el caso de los rectificadores de media onda como en los de onda completa, es posible lograr, además, que la corriente se

mantenga constante con tanta aproximación como sea necesario. Esto se consigue combinando con el diodo adecuadamente capacitores, bobinas o ambos componentes. En la figura 6.29 a, se muestra el esquema de un circuito rectificador de media onda al cual se le ha conectado un capacitor de alta capacidad. La corriente rectificada por el circuito tiene las características representadas en la gráfica, de la figura 6.29 b, con un trazo continuo. En este caso, durante el primer cuarto de periodo en que el diodo se encuentra polarizado en directa, el condensador C se carga. A partir de este instante, cuando la corriente comienza a disminuir, el capacitor se descarga a través del resistor. Si la capacidad es lo suficientemente grande como para que su tiempo de descarga sea mayor que los tres cuartos de periodo restantes, entonces durante el semiperiodo que el diodo no conduce se mantendrá circulando corriente por el resistor.

Como este proceso se repite periódicamente, durante todo el tiempo se mantendrá la circulación de corriente en el circuito.

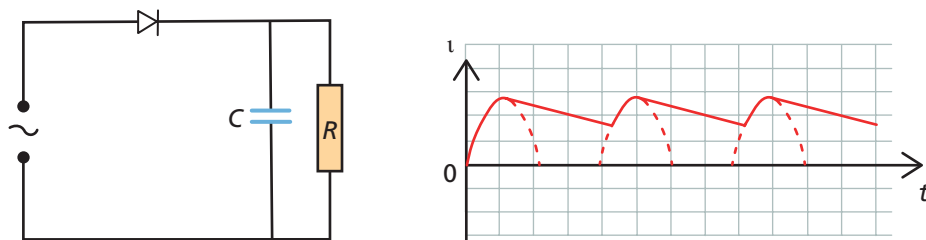


Fig. 6.29 a) Circuito rectificador de media onda con capacitor; b) Gráfica de la corriente en función del tiempo a través del resistor

En la figura 6.30 a se representa el caso de un circuito rectificador de onda completa al cual se le ha conectado un capacitor. La gráfica correspondiente a la intensidad de la corriente que se obtiene en este caso está representada en la figura 6.30 b.

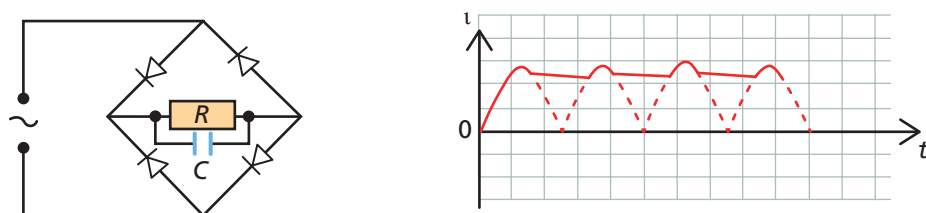


Fig. 6.30 a) Circuito rectificador de onda completa con capacitor acoplado; b) Gráfica de la intensidad de la corriente por el resistor en función del tiempo

Comprueba tus conocimientos

- 19.** Representa y describe el funcionamiento de un circuito rectificador de:
- a) media onda;
 - b) onda completa;
 - c) media onda con capacitor.

6.5 La electrificación en Cuba

Para transmitir la energía a las grandes ciudades se utiliza la corriente alterna, pues ella se puede transformar variando sus valores de voltaje e intensidad con la ayuda de transformadores. O sea, que, aunque muchos de nuestros equipos electrodomésticos: celulares, tabletas, radios, etc., en su interior trabajan con corriente directa, la corriente se transmite por las líneas de forma alterna, pues como explicamos anteriormente, ella se puede transformar con la ayuda de transformadores. Transmitir la corriente a grandes distancias con corriente directa sería mucho más costoso y no se realiza por ningún país.

En nuestro país, a partir del triunfo de la Revolución en 1959, se ha desarrollado un amplio programa para la electrificación del país. En la actualidad, casi el 100 % de los habitantes de nuestro país cuentan con servicios de corriente eléctrica y en estos momentos se ejecuta un plan para asegurar la creciente demanda de energía para el desarrollo del país y cambiar la matriz energética de la generación. Para ello, se trabaja en sustituir las fuentes de energía de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, como la eólica y la solar, fundamentalmente. El propósito es el de lograr, lo antes posible, una generación de energía eléctrica 100 % limpia.

Los países del Caribe son azotados por ciclones tropicales y todos los habitantes de Cuba han vivido en algunos momentos esas experiencias. Estos eventos meteorológicos destruyen las líneas de transmisión de la corriente eléctrica y los bancos de transformadores. Nuestro país realiza la reparación y recuperación de esas instalaciones en días o semanas, y en estos casos es relevante el profesional y abnegado trabajo que realizan los ingenieros y técnicos del sector electroenergético. Son muchos los ejemplos sobre esto, inclusive, nuestros linieros, como se le llama a los técnicos que reparan las líneas de transmisión de la corriente eléctrica, prestan servicios en países del Caribe, cuando estos son azotados por dichos eventos climatológicos.

Tareas generales de capítulo

1. En el circuito LC de la figura 6.31, la frecuencia del generador es de 1 000 Hz. Si se conoce que la capacidad del capacitor es $4,0 \cdot 10^{-6}$ F. Calcula: periodo T de las oscilaciones del circuito y la inductancia L de la bobina.

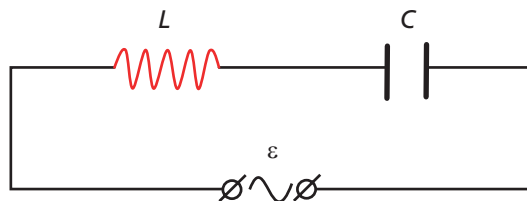


Fig. 6.31

2. La intensidad de la corriente que circula por el circuito mostrado en la figura 6.32, está dada por $i = 141,4 \sin(60\pi t)$ (A;s). Se conoce que el valor del resistor es de 1,0 kΩ.

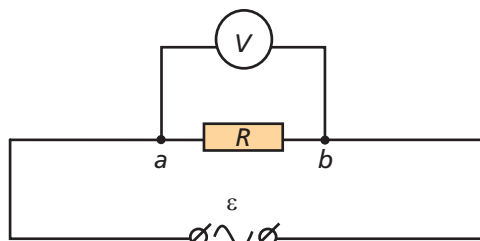


Fig. 6.32

- a) Calcula el valor de la intensidad efectiva en el circuito.
 - b) Escribe la ecuación de la tensión en los extremos del generador, en función del tiempo.
 - c) Calcula el valor de la tensión que indica el voltímetro.
 - d) Construye la gráfica de la dependencia de $u_{ab} = f(t)$.
3. La intensidad de la corriente que circula por el circuito mostrado en la figura 6.33 está dada por $i = 0,5 \sin(16\pi t)$ (A;s). Si la bobina tiene una inductancia de valor 50 mH.

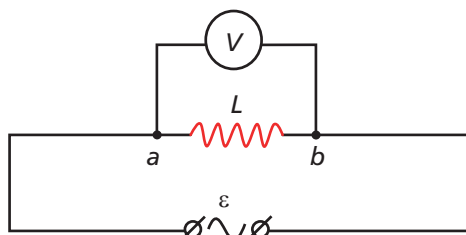


Fig. 6.33

- ¿Cuál es el valor de la intensidad máxima en el circuito?
 - Escribe la ecuación de la tensión en los extremos del generador en función del tiempo.
 - Calcula el valor de la tensión que registra el voltímetro.
 - Construye las gráficas de $u_{ab} = f(t)$ e $i = f(t)$ del circuito.
4. La intensidad de la corriente que circula por el circuito mostrado en la figura 6.34 está dada por $i = 7\text{sen}(80\pi t)(\text{A};\text{s})$. Se conoce que el valor de la capacidad es $5,0 \text{ mF}$.

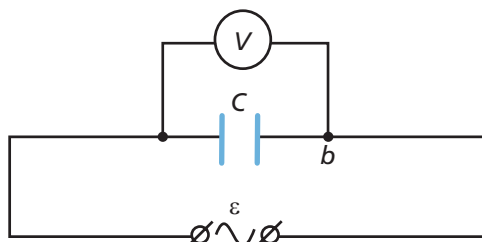


Fig. 6.34

- ¿Cuál es el valor de la intensidad máxima de la corriente en el circuito?
 - Escribe la ecuación de las oscilaciones de la tensión entre los puntos a y b , en función del tiempo del tiempo asociado al generador.
 - Calcula el valor de la tensión que marca el voltímetro.
 - Construye las gráficas de $u_{ab} = f(t)$ e $i = f(t)$.
5. La gráfica de la figura 6.35, representa las oscilaciones armónicas de la carga eléctrica, almacenada en las armaduras de un capacitor de capacidad igual a $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, conectado a una fuente de CA.

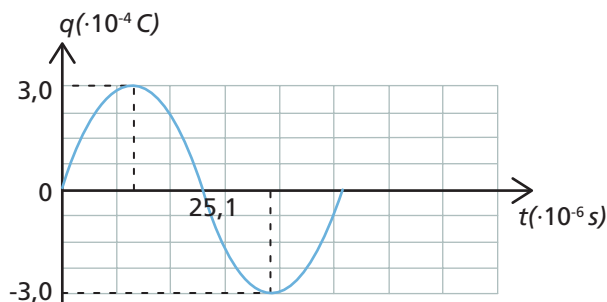


Fig. 6.35

- ¿Cuál es el valor de la carga máxima de las placas?

- b) Determina el período y la frecuencia angular de las oscilaciones de la carga.
 - c) Determina la reactancia capacitiva del condensador.
 - d) Escribe las ecuaciones de las oscilaciones armónicas de la intensidad de la corriente en el circuito y la tensión entre las armaduras.
6. Construye la gráfica de las oscilaciones de la tensión entre las armaduras del capacitor y de la intensidad de la corriente en el circuito. Un circuito RLC en el que se conocen los valores de $R = 10\Omega$, $L = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ H}$ y $C = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ F}$, se encuentra en resonancia. Con los datos dados:
- a) Determina la frecuencia angular de las oscilaciones forzadas en el circuito.
 - b) Determina la reactancia capacitiva e inductiva del circuito.
 - c) Determina la impedancia del circuito.
 - d) Si la amplitud de las oscilaciones de la tensión de entrada del circuito es de 14,1 V, determina los valores que marcan los voltímetros en los extremos de cada uno de los elementos.
7. Un circuito RLC está en resonancia cuando alcanza la frecuencia de 2,0 kHz. Se conoce que la capacidad del condensador es $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ y la resistencia óhmica del circuito es 2,0 k Ω . La tensión de la fuente varía por la ley $u = 20\cos(2,0 \cdot 10^3 t)(\text{V}; s)$. Determina:
- a) La reactancia capacitiva e inductiva del circuito.
 - b) La inductancia de la bobina y la impedancia del circuito.
 - c) El desfase entre la corriente y la tensión en el circuito
8. Desafío: Teniendo en cuenta los datos del problema anterior ¿Cuál debe ser la frecuencia angular de las oscilaciones en el circuito, para que el desfase entre la corriente y la tensión a la salida de la fuente sea de 45° ?
9. Una bobina de inductancia $2,0 \cdot 10^2 \text{ mH}$ se conecta a una fuente alterna de un generador de CA, que entrega una tensión que oscila con la ecuación $u = 20\sin(100\pi t)(\text{V}; s)$. Determina:
- a) El valor de la reactancia inductiva.
 - b) El valor de la corriente máxima en el circuito.
 - c) Escriba la ecuación de las oscilaciones de la intensidad de la corriente $i = f(t)$, para el circuito.
10. Un solenoide con un núcleo de hierro posee una inductancia de 2,0 H y una resistencia óhmica en el devanado de 100 Ω . Se conecta a una

fuentes de CA de frecuencia 400 Hz, cuya tensión eficaz es de 20 V. Determina el valor efectivo de la intensidad de la corriente que circula en el solenoide.

- 11. Desafío:** La figura 6.36, representa el diagrama de un circuito de CA. Teniendo en cuenta los desfases que se producen entre las corrientes y las tensiones estudiados anteriormente y la Ley de Ohm. Dibuja en un diagrama fasorial la suma de la tensión y la corriente en el circuito. Dibuja en un diagrama fasorial la suma de la tensión y la corriente en el circuito

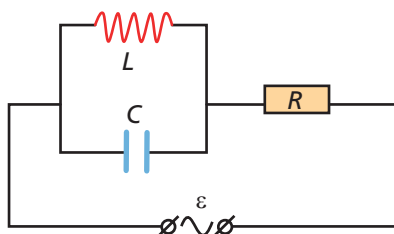


Fig. 6.36

- 12.** En un circuito de corriente alterna se conectan en serie una resistencia R , un capacitor de capacidad C y una bobina de inducción L . La amplitud de la corriente en el circuito es I_m . Determina la potencia media, P , liberada en cada elemento del circuito en un periodo.



CAPÍTULO 7

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ Ondas electromagnéticas ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

En la actualidad, cada vez más personas se comunican e interactúan con los más diversos equipos a distancia, utilizando tecnología inalámbrica como, por ejemplo, la WiFi.

Los múltiples usos de las tecnologías de localización como la GPS; la televisión; la telefonía móvil; el estudio del cosmos mediante telescopios y radiotelescopios; los radares que operan con ondas electromagnéticas y son de gran importancia para el seguimiento de los huracanes y, en general, para el pronóstico del tiempo -en Cuba ocho radares meteorológicos operan automáticamente y ejecutan una exploración completa de la atmósfera cada 10 min (figura 7.1)-. Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones de las ondas electromagnéticas en la vida cotidiana, la tecnología y la ciencia. También, en el campo de la medicina, nos resultan familiares el uso de los llamados Rayos X y las terapias basadas en el uso de las radiaciones para tratar muchas enfermedades. La purificación del agua mediante radiaciones ultravioletas o el cuidado que debemos tener con este tipo de radiaciones, son otros aspectos muy conocidos y, sin dudas, podrías citar muchas otras aplicaciones de las ondas electromagnéticas, aún sin tener un conocimiento sobre como se han logrado estos desarrollos.

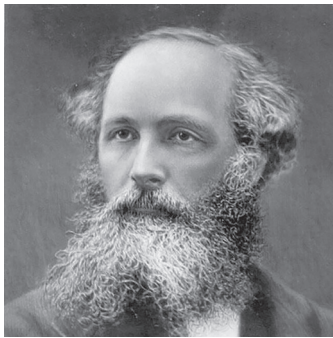
De hecho, al tratar este tema, otros jóvenes estudiantes como tú, se han interesado en conocer las características de este tipo de ondas y poder comprender cómo son utilizadas. Ampliar y profundizar en los conocimientos que ya tenemos sobre las ondas electromagnéticas será, en líneas generales, lo que se hará en este capítulo.

Recorrer el proceso del descubrimiento de las ondas electromagnéticas y el desarrollo posterior de sus múltiples aplicaciones constituye de hecho una verdadera y emocionante aventura científica, que esperamos disfrutes.



Fig. 7.1 Radar meteorológico de la Gran Piedra en la provincia de Santiago de Cuba

La existencia de las ondas electromagnéticas, propuesta formulada teóricamente por el físico inglés J. C. Maxwell, fue algo tan revolucionario que solo después de su comprobación experimental por parte de científico alemán Henritz Hertz, encontró plena aceptación en la comunidad científica (figura 7.2).



a



b

Fig. 7.2 a) James Clerk Maxwell (1831-1879), formuló su teoría sobre el campo electromagnético y predijo teóricamente la existencia de la ondas electromagnéticas, ya especuladas por Faraday, en 1865; b) Henrich Hertz (1857-1894), demostró en 1888 la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell

7.1 Relación entre los campos eléctricos y magnéticos variables. Ondas electromagnéticas

En la unidad anterior estudiaste las oscilaciones electromagnéticas que surgen en un circuito oscilatorio formado por un capacitor de capacidad

eléctrica C y una bobina con inductancia L (figura 7.3 a). Entre las armaduras del capacitor se encuentra el campo eléctrico que es variable porque la carga almacenada en sus placas oscila de forma periódica y en la bobina existe un campo magnético variable, asociado a la corriente que también oscila de forma periódica. El valor de la intensidad del campo eléctrico (E) y de la inducción del campo magnético (B), oscilan armónicamente como se muestra en la gráfica de la figura 7.3 b. Ambos campos se encuentran *separados* y originados por el movimiento de las partículas en el conductor (**corriente de conducción**).

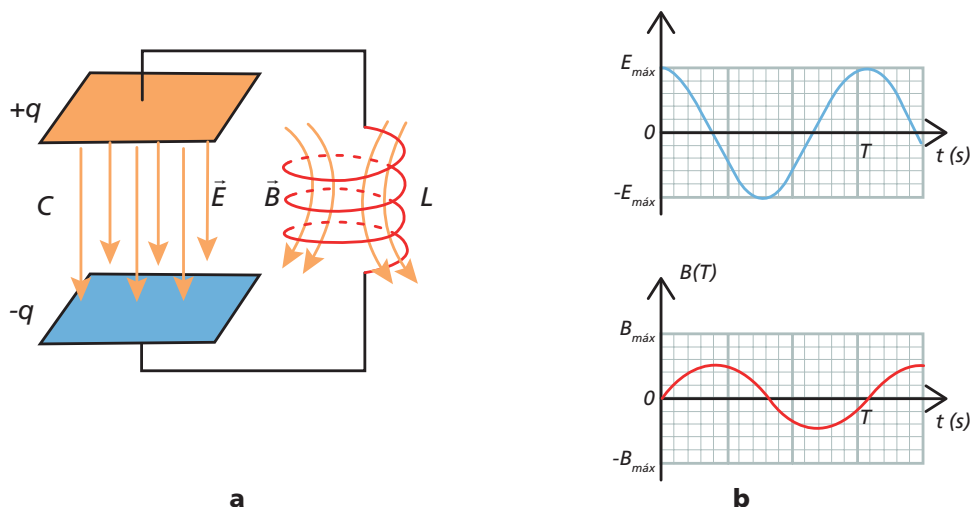


Fig. 7.3 a) Circuito oscilante LC, el campo eléctrico del condensador y el campo magnético en la bobina, son variables en el tiempo; b) Gráfica de las oscilaciones periódicas de la intensidad del campo eléctrico en el condensador y de la inducción del campo magnético en la bobina

*¿Pudiera existir en el circuito de la figura 7.3, una región donde el campo eléctrico se relaciona con el magnético formando un solo campo llamado **electromagnético** y que no se relacione con la corriente de conducción?*



De la historia

Maxwell, considerado por muchos el físico más notable del siglo XIX, murió en 1879, el mismo año en que nació Albert Einstein, considerado el físico más notable del siglo XX, así mismo ocurrió con Newton quien nació en 1642, el mismo año en que murió Galileo Galilei. En sus investigaciones,

escritos y trabajos, Maxwell explica las propiedades del electromagnetismo. Estos trabajos le convirtieron en uno de los científicos más importantes del siglo XIX. Desarrolló una teoría matemática que relaciona las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos. Los trabajos de Maxwell lo llevaron a predecir la existencia de las ondas electromagnéticas e identificó la luz como un fenómeno electromagnético.

Maxwell conocía de la hipótesis de Faraday, relacionada con la inducción del campo eléctrico rotacional variable cuando variaba el campo magnético, como aparece en la figura 7.4 a, y por ello se preguntó si no podría ser a la inversa, *¿podría un campo rotacional eléctrico inducir un campo magnético rotacional variable?*

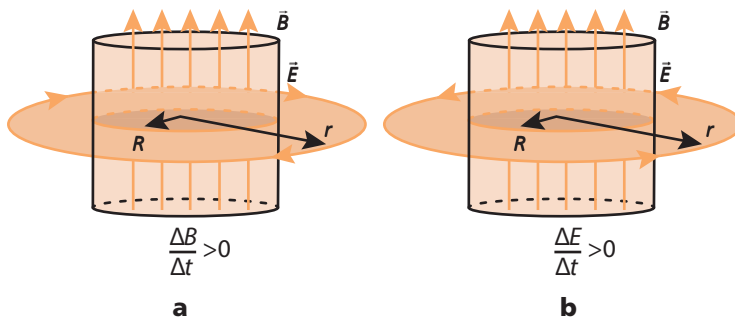


Fig. 7.4 a) El campo magnético variable induce al campo eléctrico rotacional;
b) El campo eléctrico variable induce al campo magnético variable

La práctica ha confirmado la suposición de Maxwell. En la figura 7.4 b se representa, la inducción del campo magnético variable por un campo eléctrico variable.

Para determinar el sentido del campo eléctrico rotacional inducido, se utiliza el criterio planteado en la ley de Lenz. Las líneas del campo eléctrico inducido tiene un sentido tal, que el efecto de la corriente que él origina es opuesto a la variación del campo magnético inductor.

¿Cómo determinar el sentido las líneas del campo magnético inducido por el campo eléctrico variable?

El campo magnético está asociado a la corriente. Maxwell formuló la hipótesis de que toda variación del campo eléctrico es equivalente a la existencia de una corriente eléctrica que denominó *corriente de desplazamiento* I_d .

Conocer el sentido de la corriente de desplazamiento permite determinar el sentido de las líneas del campo magnético inducido mediante la regla de la mano derecha.

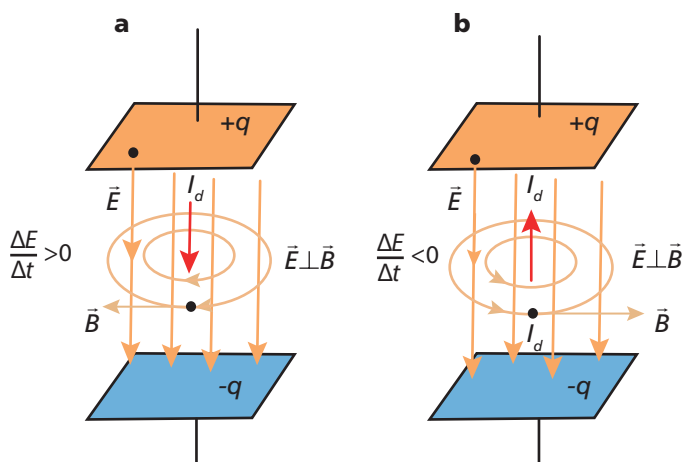


Fig. 7.5 a) Cuando aumenta el campo eléctrico, la corriente de desplazamiento tiene el sentido de las líneas de fuerza; b) Cuando disminuye el campo eléctrico, la corriente de desplazamiento tiene sentido contrario a las líneas de fuerza. En ambos casos, el campo eléctrico y magnético variable se encuentran en planos perpendiculares

En el proceso de cargar el capacitor, la intensidad del campo eléctrico aumenta ($\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$) y el sentido de la corriente de desplazamiento I_d es el mismo que el de las líneas de fuerza del campo eléctrico (figura 7.5 a). Aplicando la regla de la mano derecha, el sentido de las líneas de inducción del campo magnético, es en el sentido horario. El vector inducción del campo magnético inducido se encuentra en un plano perpendicular al plano donde se encuentra el vector intensidad del campo eléctrico ($\vec{E} \perp \vec{B}$).

Cuando el capacitor, comienza el proceso de la descarga (figura 7.5 b), la intensidad del campo eléctrico disminuye ($\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0$) y el sentido de la corriente de desplazamiento I_d es contrario al sentido de las líneas de fuerza, cambiando el sentido de las líneas del campo magnético inducido.

La explicación de la existencia de estas posibilidades de la inducción de los campos magnéticos y eléctricos rotacionales condujo a Maxwell a

predecir la posibilidad de la obtención del campo electromagnético y la propagación de las ondas electromagnéticas.

Hipótesis de Maxwell sobre la generación del campo electromagnético

Como dijimos, Maxwell postuló teóricamente que cuando las partículas cargadas oscilan periódicamente en un conductor, el campo eléctrico que las rodea, es variable en el tiempo e induce un campo magnético que también es variable. En la figura 7.6 aparece un conductor al que se le aplica en sus extremos una diferencia de potencial alterna. La partícula con carga positiva oscila de forma armónica con una frecuencia en la dirección del conductor. La intensidad del campo eléctrico en cualquier punto del campo, por ejemplo en el centro del conductor, cambia en **sentido y valor**, durante el movimiento oscilatorio de la partícula. El campo eléctrico de la carga de la partícula es **variable** en el tiempo e induce, a su vez, un campo magnético variable. Estos procesos sucesivos de inducción mutua de los campos se repite y puede representarse como aparece en la figura 7.6.

Estos procesos de inducción mutua de los campos eléctricos y magnéticos van ocurriendo cada vez en zonas más alejadas del lugar donde se iniciaron o sea se propagan a través del medio circundante, por ello Maxwell denominó a este fenómeno *propagación del campo electromagnético*, pues igualmente, a partir de una excitación de la carga eléctrica, en cierta región, los campos eléctricos y magnéticos en estrecha relación avanzan.

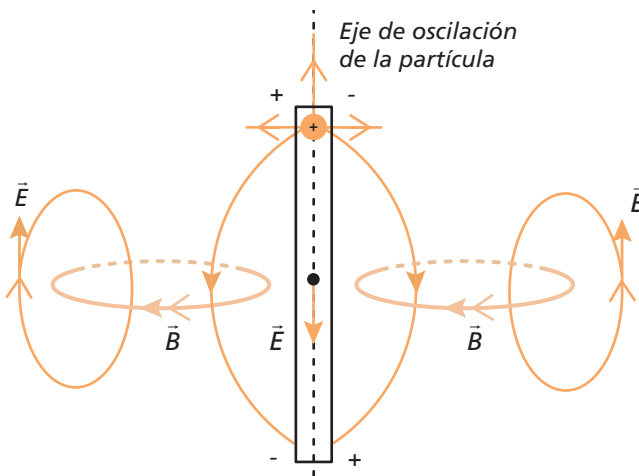


Fig. 7.6 La partícula con carga eléctrica oscila dentro del conductor con una frecuencia y su campo eléctrico es variable, induciendo un campo magnético variable

Las ondas electromagnéticas constituyen la propagación en el espacio del campo electromagnético variable.

Características de las ondas electromagnéticas

1. Las ondas electromagnéticas son transversales. Esto deriva de que los campos eléctrico y magnético oscilan en planos perpendiculares entre sí y cada uno es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como se muestra en la figura 7.7, que corresponde a una onda sinusoidal plana.

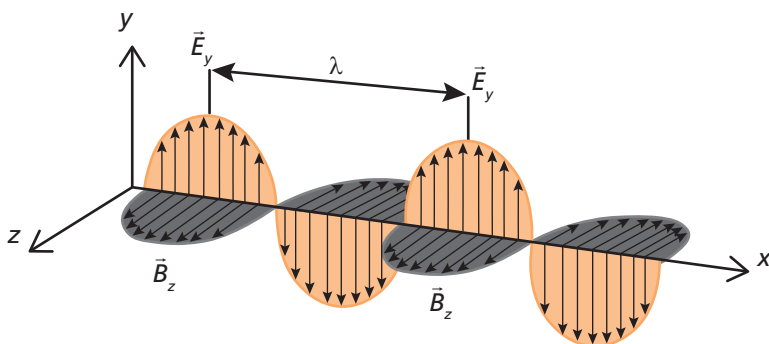


Fig. 7.7 Representación de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética sinusoidal que se propaga en la dirección del eje x

2. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es constante y su valor en el vacío es $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. La dirección de propagación de la onda, queda determinada por el producto vectorial $\vec{c} = \vec{E} \times \vec{B}$. En la figura 7.8, al aplicar la regla de la mano derecha, la onda electromagnética se propaga en la dirección del eje x .

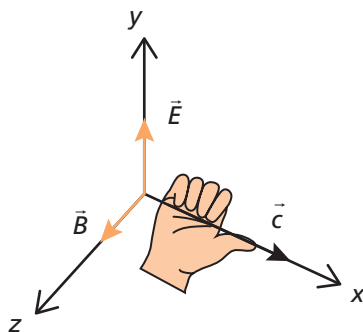


Fig. 7.8 Producto vectorial, $\vec{c} = \vec{E} \times \vec{B}$ para determinar la dirección y sentido de la velocidad de propagación de la onda

La intensidad del campo eléctrico y la inducción del campo magnético de la onda, se relacionan con la ecuación $c = EB$.

3. Las ecuaciones de una onda electromagnética sinusoidal como la representada en la figura 7.7, donde el campo eléctrico oscila en la dirección del eje y , y el campo magnético oscila en la dirección del eje z , son similares a la ecuación de una onda mecánica transversal que se propaga a lo largo de una cuerda:

$$E_y = E_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - kx) \text{ y } B_z = B_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - kx)$$

4. Las ondas tienen la misma velocidad de propagación en el vacío c y se determina conociendo los valores de la frecuencia y de la longitud de onda, mediante la ecuación:

$$c = \lambda \cdot \nu \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow 7.1$$

Las ondas electromagnéticas difieren en frecuencia y longitud de onda, constituyendo el espectro electromagnético (figura 7.9). Las ondas de menor frecuencia tienen mayor longitud de onda y viceversa.

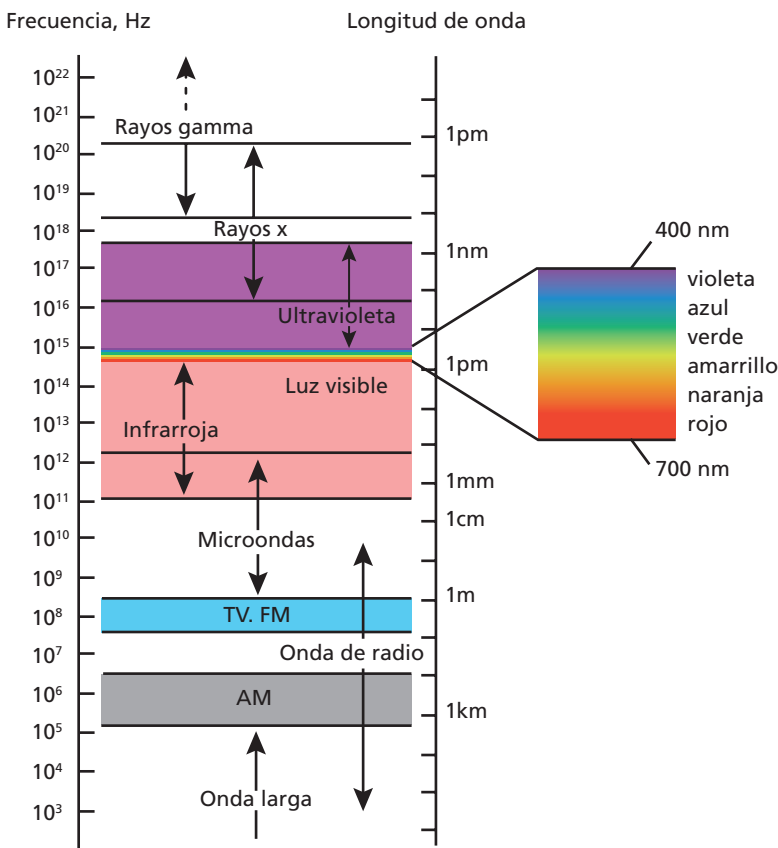


Fig. 7.9 Espectro de las ondas electromagnéticas en función de la frecuencia y longitud de onda

5. Las ondas electromagnéticas transportan energía que se evidencia por ejemplo en los hornos de microondas y las radiaciones infrarrojas utilizadas en la medicina.

Comprueba tus conocimientos

1. ¿A qué conclusión llegó Maxwell al analizar el fenómeno de la inducción de un campo eléctrico rotacional como consecuencia de la variación del campo magnético rotacional?
2. ¿Cómo se utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo eléctrico rotacional inducido?
3. ¿Qué ventaja reporta el considerar la existencia de la corriente de desplazamiento en la zona donde existen campos eléctricos variables?
4. En la figura 7.10 a, se muestra un campo magnético que se incrementa y otro que decrece con el tiempo figura 7.10 b. Dibuja en tu libreta en cada caso las líneas de inducción del campo eléctrico inducido y su sentido.

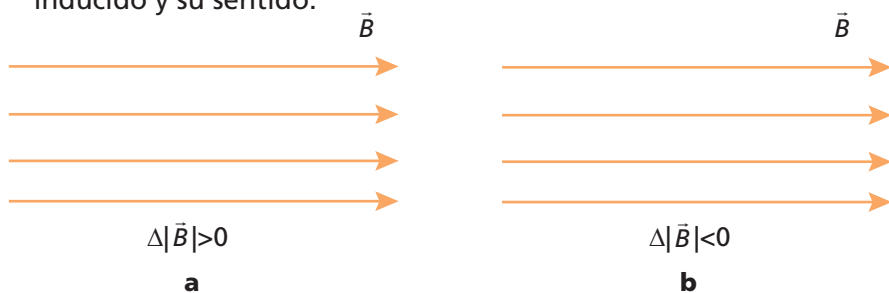


Fig. 7.10

5. En el esquema de la figura 7.11 a, el capacitor se está cargando y en la 7.11 b, el capacitor se está descargando. Representa en tu libreta, en cada caso, la corriente de desplazamiento I_d , las líneas de inducción del campo magnético rotacional y su sentido.

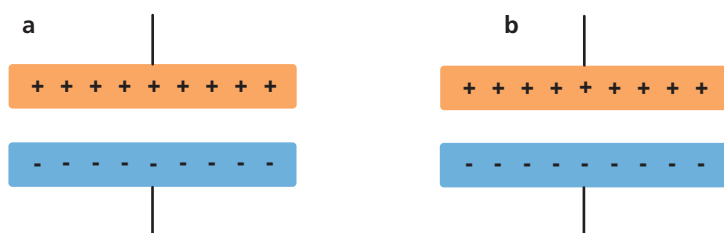


Fig. 7.11

7.2 Obtención de ondas electromagnéticas. Experimento de Hertz

Para generar las ondas electromagnéticas se requiere de circuitos osciladores de alta frecuencia, conocidos como circuitos autosilantes. La frecuencia de las oscilaciones de estos circuitos se determina con la ecuación:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow 7.2$$

El primer circuito oscilante para generar las ondas electromagnéticas fue construido por Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemán. Hertz comprobó experimentalmente la teoría del campo electromagnético elaborada por Maxwell y midió la velocidad de propagación de las ondas. En la figura 7.12 aparece modelado el dispositivo utilizado por Hertz para generar y detectar las ondas electromagnéticas. Para generar las ondas, utilizó dos esferas metálicas separadas a una distancia pequeña, conectadas a una bobina de inducción que crea un sobrevoltaje saltando un chispa e ionizándose el aire entre las esferas, permitiendo que los electrones oscilen con aceleración; siendo el campo eléctrico, asociado a estos, variable.

La variación del campo eléctrico induce al campo magnético variable que a su vez induce al eléctrico. Estas variaciones de los campos se propagan constituyendo la onda electromagnética.

Como receptor utilizó también dos esferas metálicas separadas y unidas por un conductor. Entre las esferas se originaba la chispa, como resultado de las oscilaciones forzadas de los electrones por la acción de la componente eléctrica de la onda, cuando la frecuencia del receptor se ajusta a la frecuencia del emisor o transmisor.

El circuito oscilador utilizado por Hertz, consistió en el circuito LC abierto de alta frecuencia. ¿Cómo lo construyó? De una forma muy fácil: redujo el número de espiras de la bobina para disminuir la inductancia y

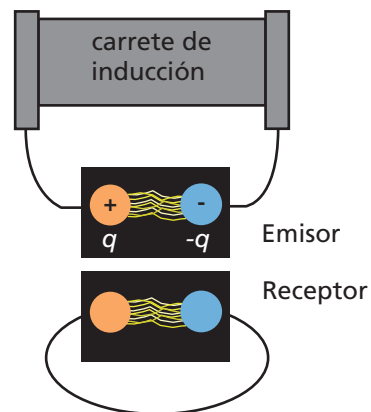


Fig. 7.12 Esquema del dispositivo de Hertz para obtener las ondas

aumentar la distancia entre las placas y disminuyó el área de estas para disminuir la capacidad del capacitor, hasta obtener el circuito que aparece representado en la figura 7.13 b.

En este circuito los valores de la capacidad y de la inductancia son muy pequeños, por lo que las oscilaciones que se producen son de alta frecuencia, del orden de los megahertz ($1,0 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$)

En la figura 7.14 se representan las dos varillas, del circuito LC abierto, conectadas a un carrete de inducción y el plano de oscilación del campo eléctrico variable asociado al movimiento oscilatorio de los electrones en el dipolo, cuando se produce la chispa entre las varillas. También se muestra el plano de oscilación del campo magnético variable, inducido, por el campo eléctrico variable. Estas variaciones de los campos eléctrico y magnético se propagan en forma de una onda viajera que denominamos **onda electromagnética** (figura 7.15).

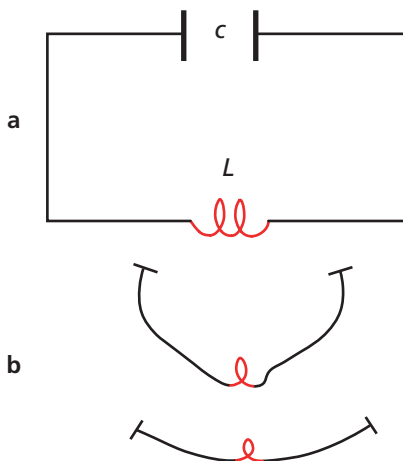


Fig. 7.13 Circuito oscilante LC
a) cerrado; b) abierto

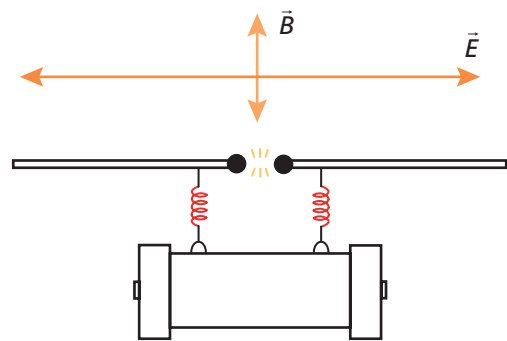


Fig. 7.14 Dipolo emisor de ondas electromagnéticas. La dirección de oscilación del campo eléctrico es paralela al dipolo. Los electrones oscilan con una frecuencia

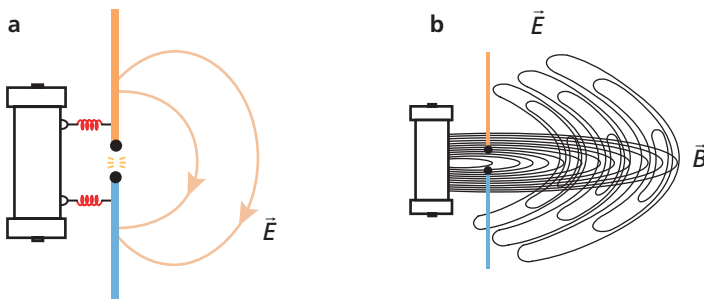


Fig. 7.15 a) Líneas de fuerza del campo eléctrico variable;
b) Propagación del campo electromagnético

Para detectar la generación de las ondas electromagnéticas se puede emplear un dipolo receptor, similar al emisor que posee una lámpara de destello. El campo eléctrico de la onda actúa sobre los electrones (oscilaciones forzadas), que oscilarán con la misma frecuencia de la onda originando una corriente alterna que provoca la iluminación de la lámpara de destello (figura 7.16). El proceso de detectar la onda electromagnética por el dipolo receptor es conocido como sintonización y se manifiesta el fenómeno de la resonancia donde la frecuencia del receptor es igual a la frecuencia del dipolo emisor.

Hertz, además de descubrir la existencia de las ondas electromagnéticas y su propagación a grandes distancias del oscilador, realizó el experimento que evidenció su naturaleza ondulatoria y que demostró la certeza de las predicciones de Maxwell.

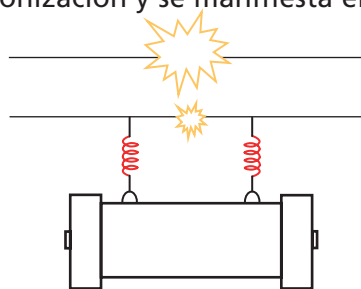


Fig. 7.16 Iluminación de la lámpara, cuando el dipolo receptor recibe la onda

Comprueba tus conocimientos

6. Describe brevemente cómo se puede pasar de un circuito oscilante cerrado a uno abierto.
7. ¿Cómo se puede variar la frecuencia de un circuito oscilador?
8. Si deseamos aumentar la frecuencia de un circuito autoscilador al doble, ¿qué debe hacerse con la capacidad del condensador?
9. ¿En qué consiste el experimento de Hertz? ¿Cómo se pueden detectar las ondas electromagnéticas emitidas por el carrito de inducción?

7.3 Propiedades de las ondas electromagnéticas

En los laboratorios escolares se dispone de un generador de alta frecuencia que produce ondas con frecuencias del orden de los 10 Hz hasta 1,0 kHz, utilizado para estudiar las propiedades generales de las ondas electromagnéticas (reflexión, refracción, difracción, interferencia y polarización, entre otras).

Conoces cómo se generan y propagan las ondas electromagnéticas y ahora se hace necesario conocer y describir sus propiedades.

Para detectar las ondas se utilizan dos receptores que aparecen en la figura 7.17: uno con la forma de trompeta, similar a la utilizada como emisora, y el otro es un dipolo en dirección vertical. Las señales recibidas por el detector originan oscilaciones de la corriente que se convierten en una señal acústica.

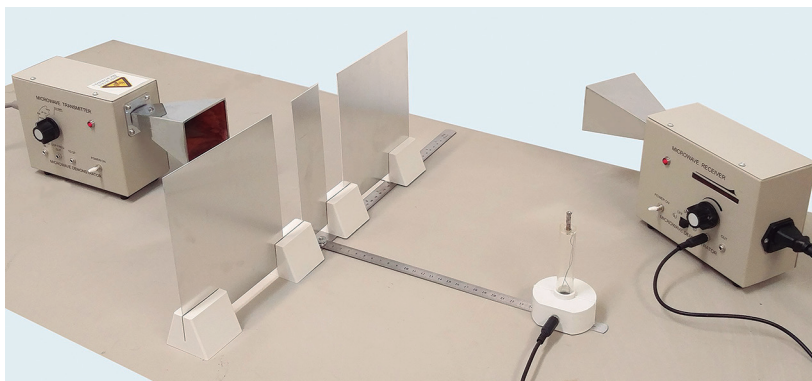


Fig. 7.17 Generador de microondas polarizadas y receptores para el estudio de las propiedades de las ondas

Con la ayuda del generador de alta frecuencia descrito, estudiaremos las principales propiedades de las ondas electromagnéticas, las cuales tienen importantes aplicaciones en la sociedad, la ciencia y la tecnología moderna.

Reflexión

De manera análoga al estudio realizado en el décimo grado referido a la reflexión de las ondas mecánicas durante su propagación, las ondas electromagnéticas se reflejan en una superficie metálica (figura 7.18).

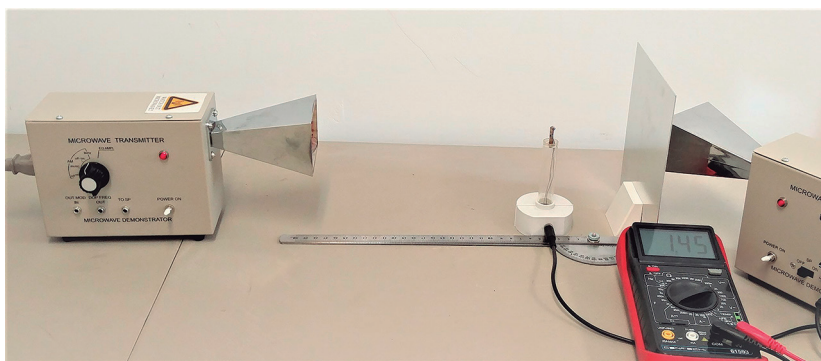


Fig. 7.18 Reflexión de las ondas electromagnéticas en una superficie metálica

Esto se demuestra, colocando una pantalla metálica entre el emisor y el receptor de las ondas (figura 7.19 a). En estas condiciones las ondas no llegan al receptor, o sea, no se detectan ya que la superficie metálica refleja totalmente las ondas. Entonces la lámina metálica se comporta como un espejo plano en el caso de la reflexión de la luz.

En la figura 7.19 b, se muestra el cumplimiento de la ley de la reflexión, o sea, cuando la onda incidente forma un ángulo respecto a la superficie metálica se refleja con el mismo ángulo.

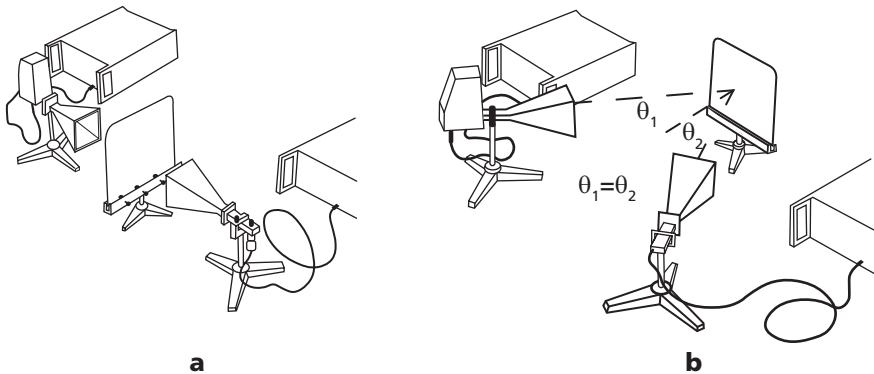


Fig. 7.19 a) Reflexión de las ondas en una superficie metálica; b) El ángulo de incidencia de la onda es igual al ángulo de reflexión

La reflexión de las ondas electromagnéticas encuentra su aplicación más importante en la utilización de los radares y otras formas de detección de posición y velocidad de los objetos, constituyendo una herramienta imprescindible en la navegación aérea y marítima actualmente.

¿Sabías que...?

El avión furtivo, también llamado avión indetectable por radar o avión invisible (figura 7.20), es un avión que ha sido diseñado para absorber y desviar las ondas electromagnéticas emitidas por los radares.



Fig. 7.20

Refracción

Si colocamos una lámina de plástico entre las dos trompetas (figura 7.19 a), la onda electromagnética se refracta y la intensidad de la señal

sonora se debilita al atravesarla. Esto se puede comprobar también si colocamos un pedazo de parafina entre las trompetas que emiten y reciben la onda electromagnética.

Lo anterior se explica por el cambio de la dirección y valor de la velocidad de la onda al pasar del aire a otro medio. Cuando las ondas electromagnéticas se refractan en medios de mayor índice de refracción la velocidad y longitud de onda disminuyen a diferencia de las ondas mecánicas. La ley de Snell para la refracción es la siguiente:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}$$

Difracción

Una de las propiedades fundamentales de las ondas es la difracción que ya conoces de décimo grado. La difracción de las ondas es el fenómeno donde se desvían al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija y debe cumplirse que la dimensión del agujero (a) sea menor o igual al valor de la longitud de la onda (λ), $a \leq \lambda$.

Un experimento posible para realizar con el equipamiento escolar, que demuestra el carácter ondulatorio de las ondas electromagnéticas, consiste en producir con ellas el fenómeno de la difracción como se representa en la figura 7.21.

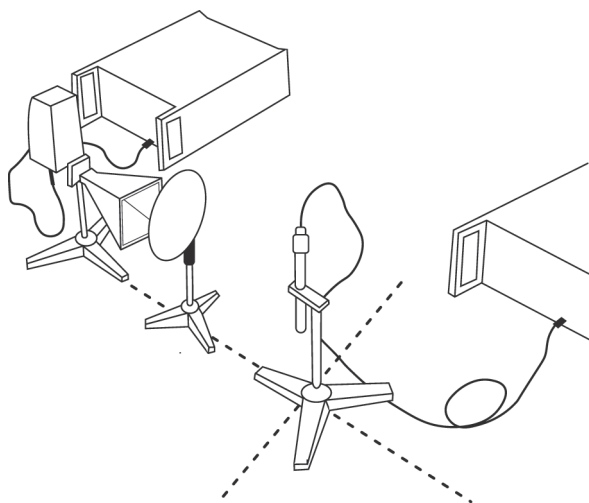


Fig. 7.21 Difracción de las ondas electromagnéticas, al bordear un disco metálico

Esto puede demostrarse colocando un disco metálico de unos 10 cm de diámetro y después exploramos la parte posterior del disco con el dipolo detector. Resulta paradójico que exactamente detrás del disco se detectan la presencia de ondas electromagnéticas. Esto significa que se produce el contorno de las ondas alrededor del disco. Al continuar explorando con el dipolo se detecta que existen zonas donde no llegan las ondas electromagnéticas, es decir, zonas de mínimos alternadas con zonas de máximos.

Interferencia

La obtención de los máximos y los mínimos de interferencia de las ondas electromagnéticas se evidencian cuando colocamos frente al emisor tres láminas separadas por dos rendijas y el receptor puede determinar las zonas de máximos y mínimos de interferencia, determinando zonas donde no se detectan y otras donde se detectan estas ondas, semejante a como ocurrió con las ondas mecánicas.

Polarización

Al estudiar las ondas mecánicas vimos que la polarización es característica solo de las ondas transversales, entonces demostraremos que las ondas electromagnéticas son transversales, pues se polarizan.

Si colocamos el emisor y el dipolo (o la trompeta receptora) en línea uno frente al otro, las ondas se detectan porque el campo eléctrico de ellas provoca oscilaciones forzadas a lo largo del dipolo receptor, es decir, el campo eléctrico está en la misma dirección y sentido en el emisor y en el receptor, los ejes del emisor y el receptor son paralelos (figura 7.22).

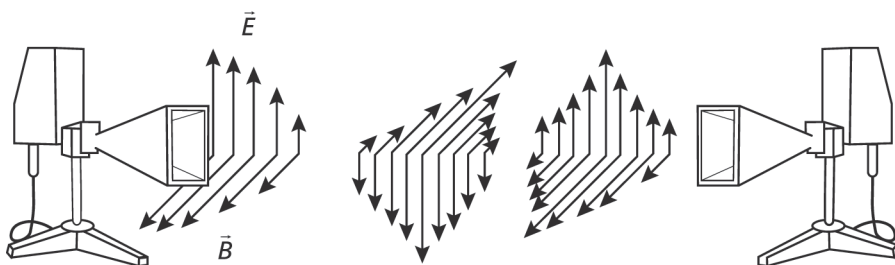


Fig. 7.22 Ondas electromagnéticas linealmente polarizadas, emitidas por el generador de microondas

El generador de microondas del laboratorio escolar emite ondas electromagnéticas linealmente polarizadas (el campo eléctrico de la onda

oscila en una sola dirección), es decir, ondas electromagnéticas que viajan en la dirección del eje x y el campo eléctrico $\vec{E}$, oscila en la dirección del eje y , y el campo magnético $\vec{B}$ está en la dirección del eje z (figura 7.23).

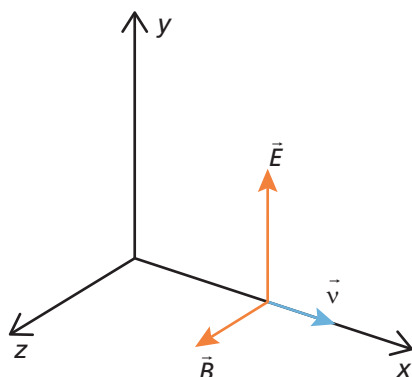


Fig. 7.23 El vector intensidad de la onda electromagnética polarizada oscila en la dirección del eje y , perpendicular al vector inducción y al vector velocidad

Rotando el detector o el dipolo, la amplitud de las oscilaciones forzadas en él se reduce hasta anularse cuando su eje se encuentra rotado 90° con el del emisor. Esta propiedad demuestra que las ondas electromagnéticas son transversales.

Comprueba tus conocimientos

10. Menciona las propiedades de las ondas electromagnéticas.
 - a) Describe un experimento que evidencie una de las propiedades.
11. Un radar emite ondas electromagnéticas de longitud de onda de $1,0 \text{ m}$.
 - a) ¿Cuál es la frecuencia del generador del radar?
 - b) ¿Qué propiedad de las ondas permite que el radar pueda detectar un avión en pleno vuelo?
 - c) Si el tiempo que demora la onda electromagnética en salir y regresar al radar es de 10^{-6} s , ¿a qué distancia del radar se encuentra el avión en ese instante?

7.4 Ondas estacionarias. Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Efecto Doppler

Ondas estacionarias

Una de las confirmaciones de las predicciones de Maxwell en cuanto a la naturaleza ondulatoria de las ondas electromagnéticas es el poder

determinar la velocidad de propagación. Para ello, se puede obtener una onda estacionaria, similar a como se obtuvo una onda estacionaria a lo largo de una cuerda en el estudio de las ondas mecánicas.

Si conocemos la frecuencia del emisor, que en nuestro caso es el generador de microondas de frecuencia entre 10 Hz y 1,0 kHz, y colocamos frente a él una lámina metálica con el dipolo detector entre ellos podemos determinar, a partir del fenómeno de interferencia, zonas de máximos y mínimos.

Recuerda que entre dos máximos o dos mínimos, existe una distancia igual a la mitad de la longitud de onda ($\lambda/2$), por lo que moviendo con cuidado el dipolo receptor resultará fácil detectar las zonas de máximos, que es donde se refuerzan las ondas provenientes del emisor con las ondas reflejadas en la placa metálica. Midiendo con una regla esa distancia se determina el valor de la longitud de onda.

Conocido el valor de la frecuencia del oscilador, se determina la velocidad con la ecuación $v = \lambda \cdot \nu$. El valor de la velocidad de propagación de la onda obtenido es aproximadamente $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Recuerda que todo proceso de medir siempre existirá asociado una incertidumbre en los valores determinados mediante las mediciones realizadas. El valor de la velocidad de la onda electromagnética calculado coincide con el valor de la velocidad de la luz predicho por Maxwell.

Efecto Doppler

La relación entre la velocidad y la frecuencia de las ondas electromagnéticas tienen una de sus aplicaciones más significativas en el llamado Efecto Doppler, que consiste en la variación de la frecuencia de la onda emitida cuando la fuente de generación de la onda se acerca o se aleja del observador. Este fenómeno se denomina así por el nombre del físico Christian Doppler (1803-1853), físico y matemático austriaco que formuló por primera vez este principio en el año 1842. El principio explica, como conoces de décimo grado, por qué cuando una fuente de sonido de frecuencia constante al acercarse al observador el sonido parece más agudo (de mayor frecuencia), mientras que si la fuente se aleja parece más grave (de menor frecuencia), este cambio en la frecuencia puede ser percibido por un observador que escuche por ejemplo el silbato de un tren que se acerca al andén. Igual fenómeno ocurre con las ondas

electromagnéticas, cuando el observador y la fuente se acercan, en virtud del Efecto Doopler, la frecuencia de las ondas aumenta, mientras que si la fuente se aleja entonces la frecuencia disminuye. Este fenómeno tiene una aplicación práctica de gran utilidad en las ondas luminosas que estudiarás en duodécimo grado y en las pistolas para el control de la velocidad de los autos para prevenir accidentes y conservar la vida.

7.5 Principio de la telecomunicación

Si en el siglo xx las telecomunicaciones alcanzaron un desarrollo impetuoso lo que permitió la transmisión a grandes distancias, con la radio y la televisión como sus exponentes más representativos, el naciente siglo xxi se ha convertido en estos pocos años en una muestra de la capacidad creadora inagotable del ingenio humano lográndose un desarrollo, impensado hace solo unos años, en materia de comunicaciones, tanto en audio como en video. En este sentido es factor determinante el perfeccionamiento alcanzado en la construcción de nuevos y más sofisticados dispositivos electrónicos, el desarrollo de la nanotecnología y la informática; pero el principio de tal desarrollo sigue teniendo como base los estudios de Maxwell y Hertz sobre las ondas electromagnéticas, comprenderás entonces que sin el aporte tan significativo de aquellos hombres de los siglos anteriores al que vives, el desarrollo del que gozas hoy sería casi imposible.

Entonces ya sabemos cuanta importancia tiene el estudio de las ondas electromagnéticas, pues constituyen el principio en el que se fundamentan las telecomunicaciones, veamos de forma sencilla cuáles son las etapas que comprende el principio de las telecomunicaciones.

¿Cómo se produce tan necesario proceso al que tan ligados *estamos hoy*?

Las etapas que comprende este proceso son:

Primera: un generador de alta frecuencia (GAF) produce oscilaciones electromagnéticas en un transmisor.

Segunda: en el proceso de generación de las ondas electromagnéticas a estas se les incorpora la información que se va a transmitir mediante un proceso que se denomina *modulación* (que consiste en superponer a las oscilaciones de alta frecuencia las oscilaciones de baja frecuencia convertidas por el micrófono), para obtener oscilaciones resultantes denominadas moduladas.

Tercera: las oscilaciones de la corriente una vez moduladas, llegan a la antena del transmisor provocando oscilaciones forzadas de los electrones, comenzando la propagación en el espacio de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia, portadoras de la información.

Cuarta: al llegar las ondas portadoras moduladas a una antena receptora provocan oscilaciones forzadas de los electrones, determinando una corriente de alta frecuencia modulada.

Quinta: en el receptor se separan las oscilaciones de baja frecuencia de las oscilaciones de alta frecuencia, proceso este que se denomina *demodulación* o *detección*.

Sexta: el resultado de la detección es una señal que llega a tu radio o telerreceptor en forma de sonido, imágenes o ambas (figura 7.24).

Oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia, obtenidas por circuitos osciladores en el transmisor.

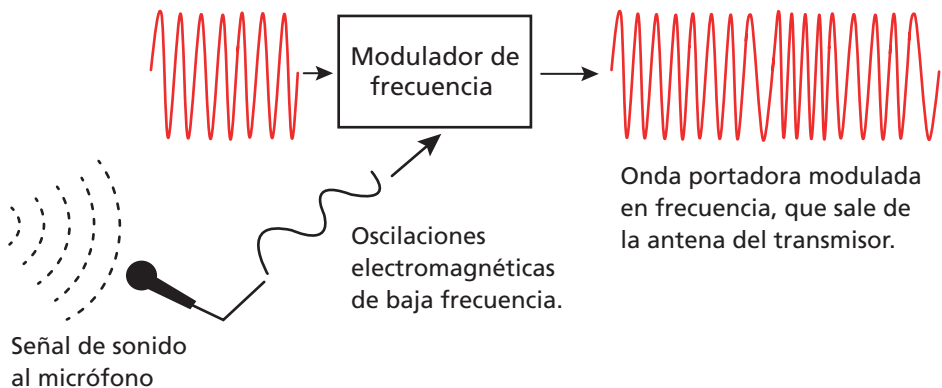


Fig. 7.24 Etapas del proceso de transmisión de la información

Existe un proceso muy importante, necesario y práctico que realizas de forma cotidiana y casi mecánicamente, que es el proceso de sintonización o detección de las ondas. Las ondas electromagnéticas provocan oscilaciones forzadas en el circuito del receptor, que se hacen máximos cuando su frecuencia es igual a la frecuencia de las ondas electromagnéticas recibidas, semejantes al fenómeno de resonancia que conoces del estudio de las ondas mecánicas. Este proceso, de "llevar" a resonancia el circuito receptor se denomina *sintonización*. Cuando cambias de estación en la radio o el canal en el TV, el circuito de tu receptor: radio o TV, entra en resonancia

con el transmisor. Por último, solo falta precisar que en tu receptor se hace el sistema de amplificación de la señal detectada para que pueda ser percibida de forma simultánea por varios usuarios.

Para la transmisión de múltiples programas de radio y televisión simultáneamente se exige que los transmisores empleen diferentes frecuencias de forma que se puedan sintonizar por separado sin interferencia, para ello se han ideado equipos que transmiten en distintas bandas de frecuencia, incluso el derecho internacional protege a los diferentes países con sus bandas de ondas, por lo que resulta una violación del derecho internacional que un país transmita en la banda de otro sin su permiso.

Otra de las más novedosas y modernas formas de aplicación de las ondas electromagnéticas en las comunicaciones es la denominada Sistema de Posición Global (GPS), también conocida como Sistema Global de Navegación por Satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, de cualquier naturaleza (persona, residencia o vehículo), con precisión de unos pocos metros, incluso, la utilización del llamado GPS diferencial permite precisiones mayores.

Este sistema fue desarrollado, instalado y empleado por primera vez por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra, a unos 20 000 km, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra. Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Basado en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante "triangulación", la cual se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias se establece fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo, además, las coordenadas o posición de cada uno de ellos, por la señal electromagnética que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenada real del punto de medición.

En la actualidad otros países como Rusia, la Unión Europea (que en materia científica trabaja como bloque) y la República Popular China han construido su propio sistema GPS.

Ejemplo resuelto 7.1

¿Cuántas oscilaciones electromagnéticas, correspondientes a una longitud de onda de 300 m, ocurren en el transcurso de un periodo de una señal sonora de frecuencia 500 Hz?

Solución:

En un período $T = \frac{1}{\nu}$ el número de oscilaciones de sonido serán $N = \frac{T_{\text{son}}}{T_{\text{elc}}}$, las señales electromagnéticas se desarrollan con período $T_{\text{elc}} = \frac{\lambda}{c}$, de esta forma $N = \frac{c}{\nu\lambda} = 2,0 \cdot 10^8$

Tareas generales del capítulo

- En muchas cocinas se utilizan hornos de microondas de frecuencia del orden de 10^{10} Hz.
 - Calcula el valor de la longitud de onda de la radiación.
 - ¿Por qué en el horno no se puede utilizar vasijas de metal?
- Una onda de radio tiene una longitud de onda igual a 3 000 m y se utiliza para transportar una onda sonora.
 - Calcula el valor de la frecuencia de la onda radial.
 - ¿Por qué la onda de radio está modulada?
- Cuando la luz (u otra radiación electromagnética) se desplaza a través de una región determinada, ¿qué magnitudes oscilan en ella y qué es lo que transporta?
- Determina si cada una de las afirmaciones siguientes, relacionadas con las ondas electromagnéticas es verdadera o falsa. Argumenta en el caso de que sea falsa.
 - La onda electromagnética constituye la propagación en el espacio del campo electromagnético.
 - La onda electromagnética es absorbida por los dieléctricos.
 - Cuando la onda electromagnética se refracta en el agua aumenta su velocidad de propagación.
 - En la sintonización de una onda radial ocurre el fenómeno de la resonancia.
 - El fenómeno de la polarización demuestra que la onda electromagnética no es transversal.
 - La onda electromagnética se difracta cuando encuentra un obstáculo de dimensión comparable con su longitud de onda.

- g) La onda electromagnética se refleja totalmente en superficies metálicas.
 - h) La componente magnética de la onda provoca oscilaciones forzadas de los electrones en el dipolo receptor.
 - i) En la sintonización de una onda radial, la frecuencia propia del circuito detector de un radio receptor es igual a la frecuencia de la onda.
 - j) Una onda electromagnética linealmente polarizada es aquella en la que la componente eléctrica oscila en una sola dirección.
- 5.** Un circuito detector de un radio tiene una bobina de inductancia de 3,0 mH y la capacidad es de $3,0 \cdot 10^{-9}$ F de forma que solo puede sintonizar una de las siguientes emisoras que transmiten ondas radiales de la siguiente frecuencia:
- a) $\nu = 160/\pi$ MHz
 - b) $\nu = 166/\pi$ kHz
 - c) $\nu = 120/\pi$ Hz
- 5.1** ¿Cuál de las emisoras será sintonizada por el radio? Realiza el cálculo necesario.
- 5.2** Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas, argumenta la tercera.
- 1)** En el proceso de sintonización de la estación, la componente magnética de la onda provoca oscilaciones forzadas de los electrones en la antena del radio.
 - 2)** La velocidad de propagación de la onda radial a sintonizar, en el aire es de $3,0 \cdot 10^8$ m/s
 - 3)** Si la capacidad del radio aumenta en 9 veces puede sintonizar una onda radial de longitud de onda 3 veces mayor.
- 6.** Sobre los orificios A y B (de 1 m de ancho), inciden ondas electromagnéticas que poseen una longitud de onda igual a 1 500 m (figura 7.25)
- a) Calcula la frecuencia de oscilación del campo electromagnético de la onda.
 - b) Diga el nombre del fenómeno que se produce cuando las ondas llegan a los orificios y al punto O. Explica tu respuesta.
 - c) ¿En el punto O las oscilaciones se refuerzan o se atenúan? Argumenta mediante cálculos.

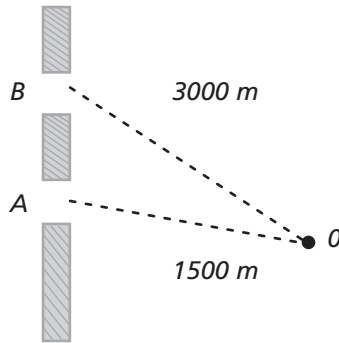


Fig. 7.25

7. Para determinar experimentalmente la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas emitidas por un generador de frecuencia 10^{10} Hz, se utiliza una placa metálica para obtener ondas estacionarias.
 - a) ¿Qué propiedades de las ondas electromagnéticas permite obtener ondas estacionarias en la región comprendida entre la placa metálica y el dipolo receptor?
 - b) Determina el valor de la longitud de onda de la onda estacionaria.
8. Una radioemisora utiliza ondas radiales de longitud de onda igual a 1 500 m.
 - a) Determina el valor de la frecuencia que debe tener el circuito detector de un radio, para sintonizar la emisora.
 - b) ¿Cuál es el nombre del fenómeno que se pone de manifiesto al recepcionar la señal radial?
9. ¿Qué propiedades de las ondas electromagnéticas se verifican mediante los montajes experimentales de la figura 7.26?

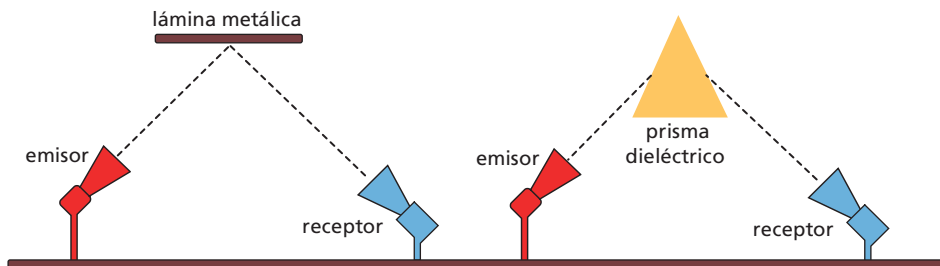


Fig. 7.26

10. Dos ondas coherentes procedentes de dos focos f_1 y f_2 interfieren en un punto Q situado a 15λ de f_1 y 18λ de f_2 :

- a) ¿Cuál es el resultado de la interferencia en el punto Q?
- b) ¿Cuál es la diferencia de fase de las oscilaciones en este punto?
- 11.** Dos generadores iguales de alta frecuencia emiten ondas electromagnéticas de frecuencia 6 MHz. Un receptor se encuentra a la distancia de 1 000 m de un generador y de 850 m del otro generador. Las ondas generadas se propagan en el aire.
- a) Determina el valor de la longitud de onda de las ondas producidas.
- b) ¿Serán de máxima amplitud las oscilaciones forzadas en la antena del receptor? Argumenta realizando los cálculos necesarios.
- 12.** En la relación aparecen las frecuencias a las que transmiten algunas emisoras y un circuito detector simple, conformado por una bobina de inductancia
- $L = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ y un capacitor de capacidad $C = 4,95 \cdot 10^{-12} \text{ F}$.

Emisora	Frecuencia de transmisión
A	600 kHz
B	1 600 kHz
C	530 kHz

- a) ¿Con cuál de las emisoras anteriores resonará este circuito oscilante?
- b) ¿Cómo debemos variar la capacidad del circuito si queremos sintonizar la emisora C? Explica tu respuesta.
- c) ¿En qué banda de longitud de onda transmite la emisora A?

RESPUESTAS A LAS TAREAS GENERALES

Capítulo 1

3. $v = 0,12 \text{ m/s}$; $P_2 = P_{\text{atmosférica}} - 540 \text{ Pa}$.
4. $v = 130 \text{ m/s}$ consideraciones: fluido ideal.
5. $r_2 = 20 \text{ cm}$; $P_1 = 2380,29 \text{ hPa}$.
6. $v_2 = v_1 = 12 \text{ m/s}$; $P_2 = 120000078460 \text{ Pa}$.
7. $h_2 = 10,002 \text{ m}$.
8. $\Delta P = 47\,040 \text{ Pa}$
9. $\Delta P = 94\,200 \text{ Pa}$
10. $v_1 = 1,58 \text{ m/s}$; $v_2 = 0,53 \text{ m/s}$; $Q = 0,033 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.
11. $v_2 = 1,84 \text{ m/s}$ $P_2 = 258,5 \text{ kPa}$
12. a) $\Delta P = 386,4 \text{ Pa}$; b) $F = 1\,545,7 \text{ N}$
13. a) $m = 4\,148,9 \text{ kg}$.

Capítulo 2

4. $n = \frac{m}{M} = 8,0 \text{ mol}$, $N = n \cdot N_A = 4,86 \cdot 10^{24} \text{ moléculas}$.
5. $P = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_c = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
6. $n_0 = \rho_{\text{He}} \frac{N_A}{M_{\text{He}}} \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
7. $P \oplus 0,1 \text{ Pa}$
8. $v \approx \sqrt{\frac{3P}{\rho}} \approx 480 \text{ m/s}$
9. $\bar{E}_c \approx 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
10. $m = \frac{PVM_{H_2}}{RT} \approx 0,12 \text{ kg}$
11. a) $P_B = 3,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; b) ver figuras R1, R2, R3.

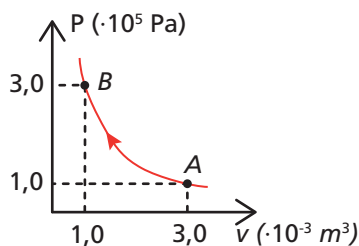


Fig. R1

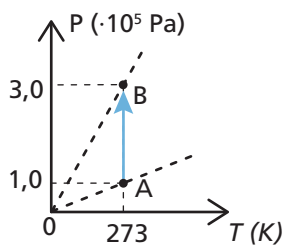


Fig. R2

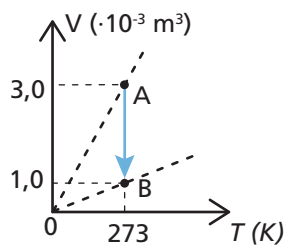


Fig. R3

12. $V_1 \approx 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, b) ver figuras R4; R5; R6.

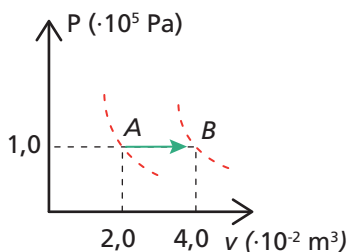


Fig. R4

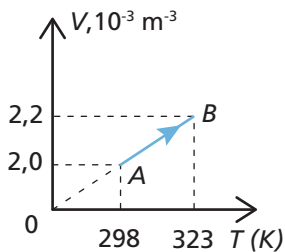


Fig. R5

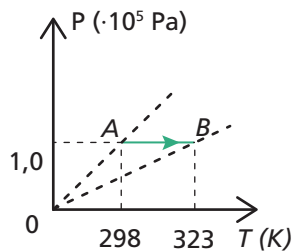


Fig. R6

13. a) $T_1 = T_0 / 2 = 200 \text{ K}$; b) $V \approx 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; b) ver figuras R7; R8 y R9.

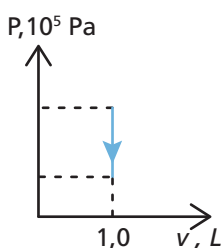


Fig. R7

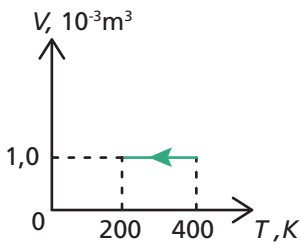


Fig. R8

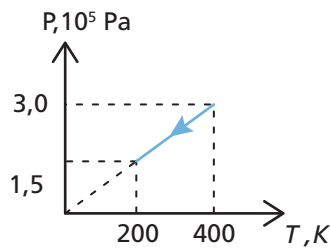


Fig. R9

- d) $m \approx 0,48 \text{ g}$; $N = nN_A = 1,8 \cdot 10^{22}$. Moléculas.

14. $T_f = T_0 \cdot 0,7 \approx 210 \text{ K}$.

15. a) 1-2 isotérmico, 2-3 isobárico, 3-1 isocórico; b) $n = \frac{8}{R} \approx 0,48 \text{ mol}$,
c) $T_3 = 100 \text{ K}$. d) permanece constante. e) ver figuras R10 y R11.

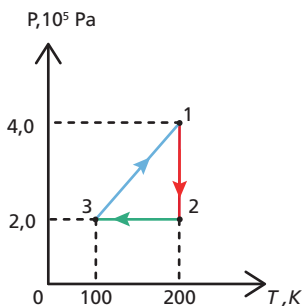


Fig. R10

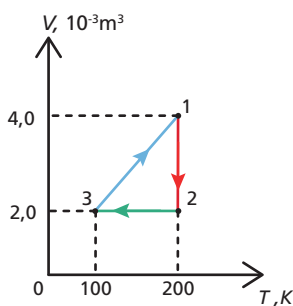


Fig. R11

16. b) $W = 800 \text{ J}$ c) $T_b = 200 \text{ K}$
 d) absorbe, realiza trabajo e) $n = 0,96 \text{ mol}$
17. b) $V_2 = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
 c) $n = 2,88 \text{ mol}$.
18. a) $W = 3\,739,5 \text{ J}$
 b) $P_1 = 9,12 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 c) $V_2 = 1,23 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$.
 d) $Q = 9\,360 \text{ J}$
20. b) $W_{\text{Total}} = -2,0 \cdot 10^2 \text{ J}$; $Q = -200 \text{ J}$
22. a) $T_c = 120,3 \text{ K}$
 b) $\Delta U = -218,25 \text{ J}$
 c) $Q_{\text{BC}} = -643,17 \text{ J}$
23. b) $W = Q$
25. b) $T_2 = 400 \text{ K}$
27. a) $W = 6\,100 \text{ J}$; b) $\eta \oplus 51 \%$; c) $P = 610 \text{ W}$
28. b) $\eta \oplus 20 \%$; c) $W = 200 \text{ J}$
29. a) $W = 400 \text{ J}$; b) $Q_{\text{absorbido}} = 1\,600 \text{ J}$
31. $\Delta U = -10^4 \text{ J}$, disminuyó la energía interna.
32. $W = 18\,697,5 \text{ J}$
33. a) $\Delta T = 6,25 \text{ K}$; b) $\Delta U = 781,25 \text{ J}$ aumentó

Capítulo 3

1. $F \approx 9,21 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
2. a) El péndulo se desvía debido a la fuerza de interacción electrostática entre la esfera conductora y el objeto cargado eléctricamente.
 b) La carga eléctrica que porta la masa del péndulo es positiva pues al tener el mismo signo que la esfera conductora estos se repelen, tal y como se muestra en la figura 3.74.
 c) Diagrama de cuerpo libre. Ver figura R12.

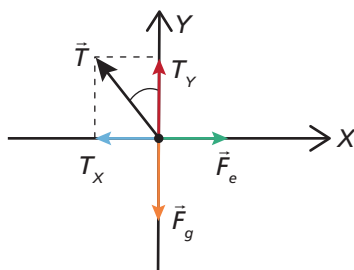


Fig. R12

d) Si la distancia a la esfera se reduce, aumenta el valor de la fuerza de repulsión entre ambos, por tanto, el ángulo que forma el hilo con la vertical aumenta también.

e) $q \approx 5,3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$

3. a)

I) $F_{12} = 6,75 \cdot 10^{-9} \text{ N}$

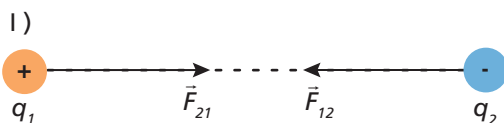


Fig. R13

II) $F_{12} = 9,0 \cdot 10^{-9} \text{ N}$

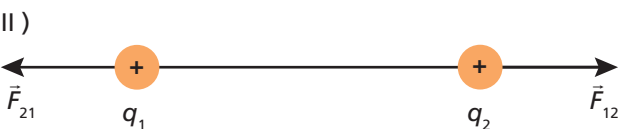


Fig. R14

III) $F_{12} = 2,16 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

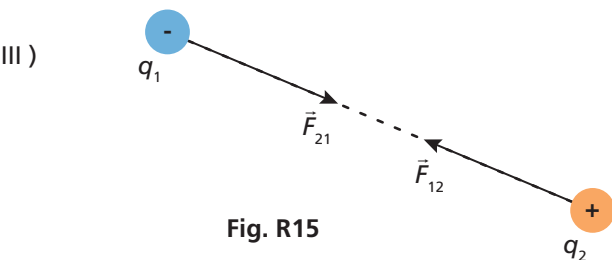


Fig. R15

b)

I) $E_1 = 18 \text{ N/C}$ $E_2 = 13,5 \text{ N/C}$

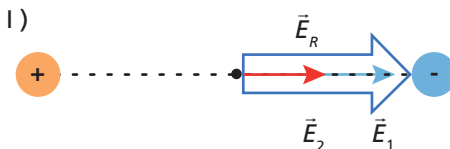


Fig. R16

II) $E_1 = 2,0 \text{ N/C}$ $E_2 = 18 \text{ N/C}$

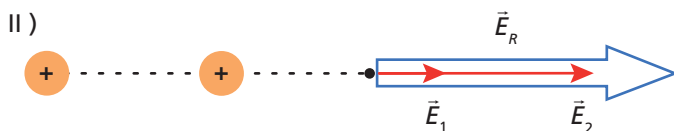


Fig. R17

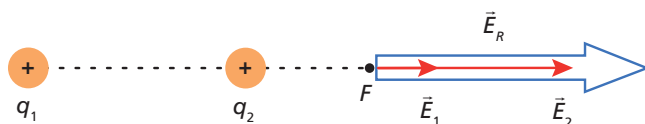


Fig. R20

b) $F \approx 1,4 \cdot 10^{-28} \text{ N}$

c) Si la distancia entre los cuerpos aumenta dos veces, la fuerza de interacción entre ellos disminuye cuatro veces. La fuerza de interacción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los cuerpos.

6. a) Signo positivo $q = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ C}$

b) $E_2 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$

$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

$E_R = 1,8 \cdot 10^4 \text{ N/C}$

c) $F \approx 2,88 \cdot 10^{-15} \text{ N}$

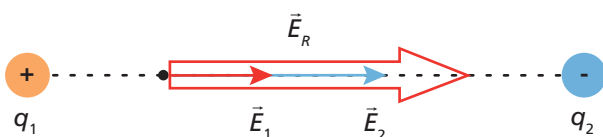


Fig. R21

7. a) Signo positivo.

b) $F = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ N}$

c) $E_1 = 1,6 \cdot 10^2 \text{ N/C}$

$E_2 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ N/C}$

$E_R = 1,52 \cdot 10^4 \text{ N/C}$

d) $F \approx 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ N}$

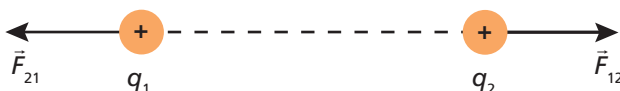


Fig. R22

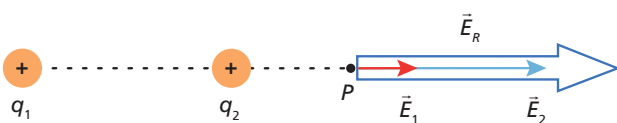


Fig. R23

8. a) Signo negativo.

b) $E_2 = 4,03 \cdot 10^2 \text{ N/C}$

c) $E_R = 4,12 \cdot 10^2 \text{ N/C}$

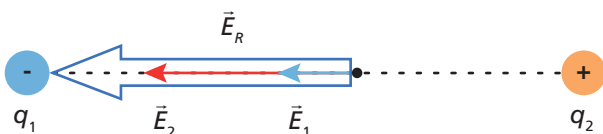


Fig. R24

9. $E_2 = 160 \text{ N/C}$

10. $E = 5,26 \cdot 10^2 \text{ N/C}$

11.

Puntos	$r \text{ (m)}$	$\vec{E} \text{ (N/C)}$	$\phi \text{ (V)}$
A	1	72	72
B	2	18	36
C	3	8	24

12. a) $\varphi_1 = -9,0\text{V}$ $\varphi_2 = 4,5\text{V}$ $\varphi_R = -4,5\text{V}$
 b) $\varphi_1 = -6,75\text{V}$ $\varphi_2 = 9,0\text{V}$ $\varphi_R = 2,25\text{V}$

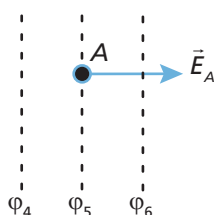
13. a) El trabajo realizado por el campo electrostático es:

- positivo en el tramo: AB
- negativo en el tramo: CD
- nulo en el tramo: BC y DA

b) La energía potencial del sistema:

- aumenta en el tramo: CD
- disminuye en el tramo: AB
- no varía en el tramo: BC y DA

14.



b) $\varphi_{1-3} = \varphi_{1-2} + \varphi_{2-3} = 8,0\text{V}$

c) $w_{AC} = -1,92 \cdot 10^{-18}\text{J}$

$w_{BC} = 0\text{J}$. Al desplazar una partícula por una misma superficie equipotencial, no se realiza trabajo.

Fig. R24

15. $E = 4,0 \cdot 10^3\text{ N/C}$

16. $r = 1,0\text{ m}$

17. La energía cinética del electrón aumentó en $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ y la energía potencial disminuyó en ese mismo valor.

18. $m \approx 8,9 \cdot 10^{-17}\text{ kg}$

19. a) $E \approx 5,68\text{ N/C}$; b) $w = 4,55 \cdot 10^{-19}\text{ J}$; d) $U = 2,8\text{ V}$

20. a) $r_I \oplus 0,24\text{ m}$ $r_{II} = 0,5\text{ m}$ $r_{III} = 0,75\text{ m}$

b) $E_{pe} = 2,16 \cdot 10^{-7}\text{ J}$

c) $w_{AB} = 1,44 \cdot 10^{-7}\text{ J}$; $w_{AD} = 0\text{J}$; $w_{CD} = -1,44 \cdot 10^{-7}\text{ J}$; $w_{A\infty} = 2,16 \cdot 10^{-7}\text{ J}$

d) $w_{AB} = \text{motor}$ $w_{AD} = \text{nulo}$ $w_{CD} = \text{resistente}$ $w_{A\infty} = \text{motor}$

21. $d \approx 4,8 \cdot 10^{-5}\text{ m}$

22. Se duplica

23. Disminuye la cuarta parte de su energía.

24. $U_1 = 180\text{ V}$ $U_2 = 120\text{ V}$

25. a) igual $q = 4,8 \cdot 10^{-4}\text{ C}$ b) $U_1 = 24\text{ V}$ $U_2 = 96\text{ V}$

Capítulo 4

1. $B = 6,25 \cdot 10^{-1} \text{ T}$
4. $B = 7,54 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
8. $B = \pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$
12. a) $B = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$
13. c) $F_A = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
14. a) $I = 1,0 \text{ A}$ b) $d = 2R = 4,0 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
15. $I = 1,266 \cdot 10^2 \text{ A}$
16. b) $B = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ c) $I = 2,5 \text{ A}$
17. $\vec{B}_R = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ $B_R = 1,045 \cdot 10^{-4} \text{ T}$
18. $R = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
19. b) $R = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ c) $\Delta t = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ s}$
20. a) $B = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ b) $T = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ c) $a_c = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ m/s}^2$
21. b) $B = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ c) $\frac{T}{2} = 1,58 \cdot 10^{-7} \text{ s}$
22. a) $v = 2,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ b) $R = 2,275 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ c) $a \approx 1,7 \cdot 10^{10} \text{ m/s}^2$

Capítulo 5

13. c) $N = 167$ espiras
16. $U = 0,15 \text{ V}$
17. $B = 0,3 \text{ T}$
18. $B = 13 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
19. $L = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ H}$
20. $\varepsilon_i = -56,3 \cdot 10^4 \text{ V}$; $L = 4,02 \cdot 10^2 \text{ H}$
21. $\varepsilon_i = -56,3 \text{ V}$; $L = 0,04 \text{ H}$
22. $E_{mag} = 1 \text{ J}$
23. $1,2 \text{ J}$

Capítulo 6

1. $T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}; \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \approx 6,3 \text{ mH}$

2. a) $I_e = \frac{i_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \approx 100 \text{ A}$

b) $u = 141,1 \cdot 10^3 \sin 60 \pi t \text{ (V;S)}$

c) $U_e = 10^5 \text{ V}$

3. a) $I_{\text{máx}} = 0,5 \text{ A}$

b) $u = 1,256 \cos 16\pi t \text{ (V;S)}$

c) $U_e = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \approx 0,89 \text{ V}$

4. a) $i_{\text{máx}} = 7 \text{ A}$

b) $u = 5,6 \cos 80\pi t \text{ (V;S)}$

c) $U_e = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{i_{\text{máx}} X_C}{\sqrt{2}} = \frac{i_{\text{máx}}}{\omega C \sqrt{2}} \approx 4,0 \text{ V}$

5. a) $q_m = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ C}$

b) $T = 50,3 \cdot 10^{-6} \text{ s}; \quad \omega \approx 1,25 \cdot 10^5 \text{ rad / s}$

c) $X_C = \frac{1}{\omega C} \approx 2 \Omega$

d) $i = 37,5 \cos(1,25 \cdot 10^5 t) \text{ (A;s)} \quad u_c = 75 \sin(1,25 \cdot 10^5 t)$

6. a) $\omega = 2,0 \cdot 10^3 \text{ rad / s}$

b) $X_C = X_L \approx 12,5 \cdot 10^{-2} \Omega$

c) $Z = 10 \Omega$

7. a) $X_C = X_L = 100 \Omega$

b) $L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ H}, \quad Z = 2 \text{ k}\Omega$

c) En el circuito la corriente y la tensión oscilan en fase, está en resonancia el circuito.

9. a) $X_L = 20 \Omega$

b) $U_m = 20 \text{ V}$

c) $i = -1 \cos(80\pi t), \text{ (A; s)}$

$$10. I_e = \frac{U_e}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \approx 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

12. $P_R = \frac{I_m^2}{2} R$, $P_C = P_L = 0$, los elementos (capacitor y bobina) no consumen energía.

Capítulo 7

1. a) $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

2. $\nu = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Hz}$

5.1. $\nu \approx \frac{160}{\pi} \text{ kHz}$

6. a) $\nu = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Hz}$ c) se refuerza $k = 1$

7. $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

8. $\nu = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Hz}$

11. $\lambda = 50 \text{ m}$ b) se refuerza $k = 3$

12. a) Se sintoniza la emisora B, $\nu = 1600 \text{ kHz}$ c) $\lambda = 5,66 \cdot 10^2 \text{ m}$



BIBLIOGRAFÍA

- FEYMAN, R., R. LEIGHTO Y M. SANDS: *The Feynman Lectures on Physics*, Fondo Educativo Interamericano S. A., 1972.
- FRENCH, A. P.: *Teoría de la Relatividad Especial*, Ed. Reverté, España, 1988.
- GIL, P. D. Y OTROS: ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación de jóvenes de 15 a 18 años, OREALC/UNESCO, Santiago de Chile, 2005.
- KIKOIN, I. K. Y A. K. KIKOIN: *Física 2*, Ed. MIR, Moscú, 1987.
- NÚÑEZ, V. J. Y OTROS: *Física Onceno Grado*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 2014.
- RESNICK, R., D. HALLIDAY Y S. K. KRANE: *Física*, vol. 2, Ed. Continental, México, 1999.
- SERWAY, A. R. Y W. J. JEWETT: *Física para ciencias e ingeniería*, vol. 2, Cengage Learning, 2014.
- SIFREDO, B. C. Y E. L. AYALA: *El trabajo experimental asistido por recursos informáticos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física*, Sello editor Educación Cubana, La Habana, 2012.
- SIFREDO, B. C. Y P. E. GONZALES: *Física Décimo Grado, Orientaciones Metodológicas para la solución de problemas*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1987.
- YAVORKI, B. M. Y A. A. PINSKI: *Fundamentos de Física II*, Ed. MIR, Moscú, 1983.
- YOUNG, H. D. Y A. F. ROGER: *Física Universitaria*, vol. 2, Ed. Pearson, México, 2009.
- Vocabulario Internacional de Metrología*, Centro Español de Metrología, Tercera Edición, 2012.

