

FÍSICA II

Un enfoque constructivista

BASADO
EN REFORMA
CURRICULAR DGB

Aprendizaje
por
competencias



PEARSON

Prentice
Hall

®

Antonio Lara-Barragán
Héctor Núñez

Física II

Un enfoque constructivista

Física II

Un enfoque constructivista

Antonio Lara Barragán Gómez

*Licenciatura y maestría en física; maestría en pedagogía
Profesor e investigador de tiempo completo del Departamento de Física
del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
de la Universidad de Guadalajara
Profesor Investigador de tiempo parcial de la Escuela de Ingeniería Industrial
de la Universidad de Guadalajara*

Héctor Núñez Trejo

*Ingeniero Químico. Profesor de medio tiempo del Departamento de Física
del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
de la Universidad de Guadalajara*

REVISIÓN TÉCNICA

Ing. Roberto López Cruz

*Profesor de Física en el Centro de Estudios
de Bachillerato 4/1 México, D.F.
Profesor de Física en Escuelas Preparatorias
Oficiales del Estado de México*

ASESORÍA PEDAGÓGICA

Dr. Julio H. Pimienta Prieto



México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

LARA BARRAGÁN GÓMEZ, ANTONIO;
HÉCTOR NÚÑEZ TREJO

FÍSICA II: Un enfoque constructivista

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2007

ISBN: 970-26-0909-7

Área: Bachillerato

Formato: 20 x 25.5 cm

Páginas: 216

Editor: Enrique Quintanar Duarte
e-mail: enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo: Felipe Hernández Carrasco
Supervisora de Producción: Adriana Rida Montes

PRIMERA EDICIÓN, 2007

D.R. © 2007 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atacomulco 500-5o. piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial mexicana
Reg. Núm. 1031

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN 10: 970-26-0909-7
ISBN 13: 978-970-26-0909-4

Impreso en México. *Printed in Mexico.*
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 09 08 07 06



Contenido

Unidad 1 Hidráulica	1
1.1. Hidrostática	2
1.1.1. El aire como modelo para los gases	3
1.1.2. Presión y densidad	4
1.1.3. La atmósfera terrestre	13
1.1.4. Fotación	21
1.1.5. El principio de Pascal	28
1.1.6. Medición de la presión	32
1.1.7. Tensión superficial	34
1.2. Hidrodinámica	39
1.2.1. Viscosidad	40
1.2.2. La ecuación de Bernoulli	42
1.2.3. El movimiento es relativo	47
1.2.4. Las alas de los aviones	48
1.2.5. Gasto y ecuación de continuidad	50
Unidad 2 Calor y temperatura	55
2.1. Temperatura	56
2.2. Calor	60
2.3. Capacidad calorífica	60
2.4. Procesos de transferencia de calor	63
2.4.1. Convección	63
2.4.2. Conducción	64
2.4.3. Dilatación térmica	67
2.4.4. Cambios de fase	76
2.4.5. Transferencia de calor por radiación	80
2.5. Energía interna	82
Unidad 3 Electricidad, magnetismo y electromagnetismo	91
3.1. Introducción: estructura de la materia e interacción gravitacional	92

3.2. Estructura de la materia e interacción eléctrica	93
3.3. Carácter vectorial de la ley de Coulomb	96
3.4. Procesos de electrización	104
3.5. El campo eléctrico	111
3.6. Potencial electrostático	118
3.7. Diferencia de potencia y campo eléctrico	124
3.8. La corriente eléctrica	127
3.9. Resistencia eléctrica	131
3.10. Disipación de energía en una resistencia	136
3.11. La ley de Ohm	139
3.12. Circuitos	143
3.13. Magnetismo	152
3.14. Interacción magnética	153
3.15. El experimento de Oersted	155
3.16. Imanes	161
3.17. Polos magnéticos	164
3.18. Magnetismo terrestre	165
3.19. Electromagnetismo	173
3.20. Generadores y corriente alterna	175
3.21. El transformador	180

APÉNDICE 1	186
Termómetros	186
APÉNDICE 2	188
Soluciones a preguntas y problemas selectos	188
APÉNDICE 3	195
Numeralia física	195
Algunos factores de conversión	196
Alfabeto griego	196

Presentación

Las últimas décadas han visto avances tecnológicos y científicos decididamente acelerados. En los últimos 30 años, el avance ha sido mucho mayor que en los 400 años precedentes. Esta situación ha afectado notablemente a la sociedad en su conjunto en cuanto a la relación del ser humano con su entorno. En particular, la educación en nuestro país ha visto serios cambios a nivel mundial, que nos colocan en situaciones de reflexión profunda. Programas de evaluación estudiantil como el *Programme for International Student Assessment* (PISA), que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) realiza periódicamente, arroja resultados que dejan mucho que desear respecto de las aptitudes y los conocimientos científicos de los estudiantes mexicanos. Creemos que una de las causas es la obsolescencia de contenidos en cursos tradicionales —particularmente de física— impartidos en nuestro medio.

El libro que tienes en tus manos, apreciado lector, es una respuesta al clamor por un texto acorde con las exigencias de la época actual, según los cánones establecidos por la comunidad científica internacional. Presentamos, sí, la física desarrollada entre los siglos XVII y XIX, por lo que podría cuestionarse: ¿dónde está la actualidad de los contenidos? Resulta que la física de esos siglos, la llamada física clásica, es tan vigente entonces como ahora. Sin embargo, algunos de los conceptos han cambiado radicalmente y algunas de sus leyes se han ampliado en significado. El lenguaje ha sido cuidado especialmente para concordar con todos estos cambios con los que hemos llegado al siglo XXI. Pero no se trata sólo de contenidos, sino también de la metodología de presentación. Un libro para el nuevo milenio debe presentarse con la metodología que éste reclame.

En cada capítulo y en cada sección se presentan, al inicio, una serie de preguntas o actividades que tienen que contestarse o realizarse antes de proceder al estudio del material correspondiente. No dejes de hacerlo. Asimismo, intercaladas en la exposición de contenidos, hay preguntas y/o actividades a contestar o realizar en ese preciso momento. Te sugerimos, amable lector, que trates de contestar las preguntas antes de leer las respuestas y contrastar tus respuestas con las dadas en el libro. El objetivo de estas preguntas o actividades es que tú mismo evalúes tu comprensión del material estudiado. Además, cada pregunta o actividad tiene otra intención: lograr la práctica de determinada habilidad o competencia necesaria en el quehacer científico.

Esperamos que este libro cumpla con tus expectativas y deseamos que te sirva de guía para una experiencia agradable, la experiencia de hacer ciencia.

A.L.B.G.
H.N.T.

Sugerencias para estudiantes de física

En el primer libro de la serie, *Cinemática*, presentamos una serie de sugerencias para que tus estudios de física resultaran lo más fructíferos posible. En este libro volvemos a presentarlas, ya que creemos que es muy importante que no las olvides y las sigas practicando. Comencemos por recordar que la meta académica de la física es describir el número máximo de hechos que suceden en la naturaleza, en términos del número mínimo de principios generales, los que, a la vez, deben ser tan simples como sea posible. Newton expresó la idea así: *la naturaleza se complace en la simplicidad*. Con esta idea en mente, la primera sugerencia y punto de partida para usarse a través de todo tu periodo escolar es:

Trata de identificar los principios generales básicos y considera las demás *ideas discutidas como extensiones y aplicaciones de estos principios*.

La segunda sugerencia es igualmente importante:

El estudio fuera de clase debe comenzar con el primer día de clases. Según los expertos, por cada hora de clase se necesitan dos horas de estudio. Nunca, nunca dejes que se te acumule material con la idea de que lo estudiarás en los dos días anteriores al examen.

¿Debo leer mi libro o estudiar mis notas?

En la mayoría de los cursos de Física, tu principal fuente de información es un libro de texto. El papel del profesor es poner en perspectiva el material del libro, ampliándolo, aclarándolo, demostrándolo e ilustrando las ideas del texto. El tiempo que permanezcas en clase lo pasarás mejor si, de alguna manera, te has familiarizado moderadamente con el material de la sesión del día leyendo previamente las secciones correspondientes del libro. Sólo una nota precautoria: No todo lo que se encuentra escrito en los libros es una verdad absoluta e irrefutable. Los libros los escribimos seres humanos falibles, por lo que siempre son susceptibles de mejorarse o incluso de corregirse. También es papel del profesor hacer de tu conocimiento las erratas del libro y la manera en que deberás interpretar el texto o, en su caso, precisarlo.

¿Y sobre tomar apuntes? Algunos estudiantes intentan escribir todo lo que el profesor dice o escribe en el pizarrón. Si eso te es de utilidad, hazlo. Sin embargo, hay que advertir que algunas veces es conveniente dejar de tomar notas y atender, observar y escuchar atentamente, especialmente si los conceptos se encuentran en el libro. Si el profesor está explicando una figura complicada, haciendo una demostración o cualquiera cosa difícil de capturar como notas, mejor trata de absorberla mientras se está llevando al cabo. En una situación como ésta, lo más probable es que tus notas carezcan de sentido cuando llegues a tu casa o a la biblioteca; entonces, aquí lo más probable es que el libro le refresque lo que se hizo en clase. El hecho de saber cuándo tomar notas y cuándo no, es algo que sólo se aprende de la experiencia con cada profesor. Tu estudio anterior a la clase te ayudará inmensamente con este problema.

Un procedimiento general para estudiar

Como cada individuo aprende de diferente manera, siéntete en entera libertad de modificar estas sugerencias para adaptarlas a tu estudio particular. Sin embargo, te exhorto a que sigas los lineamientos generales dados a continuación, o cualesquiera otros semejantes, de forma seria.

1. Antes de comenzar a estudiar procúrate las condiciones más propicias. Un lugar con relativamente pocos (o mejor ninguno) distractores. Lleva y ten a la mano todos los utensilios que crees necesitarás: lápices o puntillas, borrador, plumas, marcadores, hojas para escribir, cuadernos de notas, libros, algún bocadillo, etcétera. Respecto de esto último, debemos recordar que para que el cerebro funcione adecuadamente debemos alimentarlo: carbohidratos de buena calidad como los que encontramos en cítricos (naranjas especialmente). Si fumas, es un buen momento de alejarte de tan nociva práctica; el humo del cigarro envenena la sangre e impide una adecuada irrigación sanguínea al cerebro. Fumar es lo peor que se puede hacer durante horas de estudio o durante un examen.
2. Antes de que se analice un tema en clase, lee en el libro el material relevante con suficiente seriedad como para introducirte en los fenómenos y principios que describe.
3. Después de clase, lee *cuidadosamente* las secciones del libro que contienen el tema. “Cuidadosamente” significa frase por frase, asegurándote de que entiendes perfectamente la frase 37 antes de pasar a la frase 38, por ejemplo. Claro está que habrá ocasiones en necesitarás continuar y regresar a la idea más adelante. Convéncete de haber comprendido el tema de la clase aun antes de pasar a los problemas o preguntas asignados de tarea. Mientras vayas leyendo el libro, compara y estudia los tópicos correspondientes en tus notas de clase. Cuando llegues a un ejemplo en el libro, antes de leer la solución, piensa en cómo responderías la pregunta o resolverías el problema. Luego siempre realiza los pasos algebraicos, es decir, repite el procedimiento de solución completo; ello te dará soltura y habilidad matemática. A llegar al estudio o lectura de una ecuación o una fórmula, di los nombres o palabras que signifiquen cada uno de los símbolos. Verbalizar las palabras usadas para las diferentes cantidades en una relación matemática ayuda enormemente a fijar en su cerebro el significado de la relación.
4. Pon mucha atención a las definiciones de nuevos términos en el capítulo y apréndetelas. Pero no nada más las memorices, compréndelas. Algunas cosas pueden derivarse de ideas más simples y, como éstas están definidas, entonces tan sólo tendrás que recordarlas. Será más fácil para ti que las cosas tengan un sentido cuando tu profesor o el libro las utilicen.
5. Después de que hayas comprendido los detalles del tema del capítulo, ve en retrospectiva y pregúntate: “¿cuál es la cosa principal que el capítulo o sección trata de decirme?” Una vez que la tengas, considera el resto del material como aplicaciones o extensiones de esa idea central.
6. Sólo después de que sientas que tienes el mejor entendimiento posible de los principios físicos del capítulo o sección, ve a los problemas o preguntas. Regresa a las secciones del texto sólo cuando sea necesario y sólo para confirmar que lo que estás haciendo es lo correcto. Trabajar con los problemas y preguntas de esta manera solidifica los principios en tu mente. Recuerda que los problemas son meras aplicaciones específicas de los principios generales y éstos son lo que necesitas para poder entender una amplia gama de situaciones. Al resolver un problema, siempre trata de referirte al principio general básico y evita, a toda costa, “insertar datos” en alguna

“fórmula” ya derivada. No olvides leer, pensar y discutir las preguntas cualitativas, se las dejen o no de tarea. Ellas ayudan a interpretar y entender los significados y aplicaciones de estos principios.

7. Anota tus preguntas y llévaselas a tu profesor o asesor inmediatamente. No resolver dudas en el momento sólo te llevará a más y más profundas dudas en temas subsecuentes.

Si sigues los lineamientos sugeridos anteriormente, cuando llegue el periodo de exámenes lo único que tendrás que hacer es repasar brevemente el material y refrescarte en procedimientos de solución de problemas. Nota que nunca se dijo que el estudio de Física sería fácil. El programa descrito es riguroso; pero también hará que tu curso de Física sea satisfactorio para tu intelecto y gratificante a la hora de recibir calificaciones.

Conoce tu libro

Antes de iniciar el estudio de tu libro, es importante que conozcas cómo se estructuró y organizó. Así le sacarás más provecho, pues tales elementos te permitirán trabajar en forma práctica cada uno de los apartados que lo integran



Reactivación de conocimientos previos

Este icono representa el primer paso del método, en el que recordarás los conocimientos que ya posees sobre un tema, lo que te ayudará a vincular esta información con los nuevos conocimientos que vas a adquirir.



Situación problemática

Este icono es representativo del segundo paso, en el cual se te dará la oportunidad de resolver un problema relativamente sencillo mediante el apoyo del profesor.



Construcción de conocimientos

Este icono pertenece al tercer paso, el cual te permitirá construir significados, es decir, identificar y seleccionar aquella información más relevante respecto al tema que estás estudiando.



Aplicación de los conocimientos

Este icono, representativo del cuarto paso, muestra la manera de poner en práctica en forma sistemática la solución de problemas relacionados con el tema, proceso que te llevará a automatizar la práctica del procedimiento o habilidad matemática.



Conclusión

Este icono representa al quinto y último paso del proceso, durante el cual tendrás la oportunidad de extraer tus propias conclusiones acerca del conocimiento adquirido de cada tema, momento que te facilitará, en determinadas circunstancias, la toma de tus propias decisiones.

Unidad 1

HIDRÁULICA

El estudio de la naturaleza que a la luz de la física hemos realizado hasta el momento tiene que ver con objetos de la vida cotidiana, por ejemplo, *sólidos*: aviones, seres humanos, automóviles, etcétera. Sin embargo, existen otros objetos constituidos por diferentes sustancias igual de importantes que los sólidos: los *gases* y los *líquidos*, entre los cuales está el aire que respiramos, el agua que bebemos y aun la sangre que el corazón bombea a través de nuestras venas y arterias. A diferencia de los sólidos, los gases y los líquidos no tienen forma propia definida y, en conjunto, se conocen como *fluidos*. Por definición, la hidráulica es la rama de la física que se encarga de estudiar el comportamiento y el movimiento de los fluidos. Así, en esta primera unidad revisaremos las dos ramas en que se divide la hidráulica: la *hidrostática*, que estudia los fenómenos asociados con los fluidos que se encuentran confinados dentro de algún tipo de contenedor —consideraremos un contenedor desde un vaso común de los que encontramos en la cocina, hasta una presa gigantesca sin movimiento—; y la *hidrodinámica*, en la que examinaremos los fenómenos que se producen cuando un fluido se encuentra en movimiento.

1.1 Hidrostática



Actividad previa

El buzo cartesiano. La construcción de un “buzo cartesiano” requiere un envase de refresco, de dos litros o menos, de plástico, y una ampolleta o un tubo de ensayo pequeño, que quepa por la boca de la botella. En el caso de una ampolleta, ésta puede ser de cualquier material: plástico, vidrio o metal, siempre y cuando sea lo suficientemente densa como para que se hunda en agua. Llena la botella con agua y coloca la ampolleta bocabajo de manera que el aire atrapado dentro de ella la mantenga a flote. Ahora, con mucho cuidado permite que salga algo de aire de la ampolleta; es decir, reduce el tamaño de la burbuja dentro de ella, hasta que quede flotando con apenas unos milímetros sobresaliendo del agua. Tapa la botella y prepárate para probar el buzo. La forma de proceder es apretar la botella con la mano; pero, antes de apretarla, hay que predecir que va a suceder al hacerlo. ¿De qué manera el hecho de apretar la botella afecta la burbuja dentro de la ampolleta y la posición de la ampolleta dentro de la botella? Es decir, ¿se hunde o flota más arriba? Aprieta la botella y observa el resultado. ¿Se verifica tu predicción? ¿Qué le sucede al tamaño de la burbuja al apretar la botella? ¿Cambia más si aprietas más fuerte? ¿Cuál es la relación entre el tamaño de la burbuja y la flotación (o profundidad a la que se hunde) de la ampolleta?

Al dejar de apretar la botella el buzo vuelve a flotar. ¿Por qué el buzo hundido vuelve a flotar nuevamente? Todavía más. Si lo haces con cuidado, puedes lograr que el buzo llegue hasta a suspenderse cerca de la mitad de la botella.

Regresaremos a la discusión del buzo cartesiano al final de la sección de hidrostática, antes examinaremos otro objeto de la vida cotidiana: los globos.

1.1.1 El aire como modelo para los gases



Preguntas previas

Por acción de la gravedad, todo objeto material que se encuentre cercano a la superficie de la tierra cae. ¿Por qué, entonces, un globo lleno con helio flota y asciende rápidamente si lo soltamos? ¿No estaremos olvidando algo respecto a este hecho? Por supuesto; estamos olvidándonos del aire: Como éste es sumamente difícil de ver y no lo podemos sujetar con la mano, por ejemplo, es fácil olvidar que está ahí; sin embargo, muchas veces hace notar su presencia. Cuando andamos en bicicleta sentimos su fuerza, tanto como cuando sopla o, en un caso extremo, cuando llega un tornado. Y cuando soltamos un globo lleno con helio, es el aire lo que lo hace subir.

Ya, que en general, los objetos caen a través de la atmósfera por acción gravitacional, ¿por qué la atmósfera misma no cae? ¿Por qué es el aire más “ligero” en las montañas que a nivel del mar? Si succionamos el aire dentro de una bolsa de papel, ¿qué es lo que hace que la bolsa se aplaste? ¿Por qué si le soplamos nuevamente la bolsa se infla? ¿Qué le sucede a la masa total de la bolsa si la llenamos con aire? ¿Y con helio? Si pudiésemos llevar un globo lleno con helio a la luna, donde no hay aire, y lo soltásemos, ¿en qué dirección se movería?

Como todos los objetos que hemos estudiado previamente, el aire tiene masa y tiene peso; sin embargo, a diferencia de otros, no tiene forma ni volumen definidos. Supongamos que disponemos de un kilogramo de aire. A esta cantidad podemos darle la forma que deseemos y lograr con relativa facilidad que ocupe diferentes volúmenes. Por ejemplo, podríamos reducirlo a un tanque de buceo o confinarlo en un salón de clases. Esto es posible porque el aire, como todos los gases, es *compresible*, lo cual significa que puede cambiarse el volumen que ocupa una cantidad dada.



Actividad

*Con una jeringa desechable, por ejemplo de 5 ml, **sin aguja**, saca el émbolo (la gomita negra) hasta unos 4 ml. Luego tapa el orificio de salida con el pulgar de la mano izquierda (si no eres zurdo[a]) y con la mano derecha empuja el émbolo. Podrás comprimir el aire dentro de la jeringa hasta un cierto volumen pequeño. El aire es compresible. Ahora, llena la jeringa con agua hasta 4 ml. Repite la misma operación. ¿Qué tan compresible es el agua?¹*

La compresibilidad proviene de la naturaleza microscópica del aire que, como todos los gases, está compuesto de pequeñísimas partículas, átomos o moléculas, que se mueven de forma independiente entre sí. Su tamaño es del orden de millonésimas de milímetro. El aire está compuesto por moléculas de nitrógeno —en su mayoría— y de oxígeno —en menor cantidad—; además de otros componentes como agua, bióxido de carbono, metano, los llamados gases nobles o inertes.

¹ El agua es incompresible.



Para comprender cómo funcionan tales partículas, imaginemos que se parecen a canicas en que cada una de ellas tiene tamaño y masa, y están sujetas a la acción de la gravedad. No obstante, la analogía tiene un problema: cuando sacamos canicas de una bolsa, todas caen al suelo y se esparcen; sin embargo, si liberamos aire de un contenedor, sus partículas no caen ni se esparcen. Entonces, si las moléculas del aire son como canicas, ¿por qué no caen y se apilan sobre la superficie de la tierra?

La respuesta a esta pregunta tiene que ver con que el aire contiene lo que denominamos *energía cinética interna*, por la cual se explica que las partículas se encuentren en movimiento de translación, al tiempo que vibran y giran sobre sí mismas. Por su parte, las canicas son demasiado masivas como para que se muevan de la misma manera y, por consiguiente, su energía cinética no se manifiesta visiblemente. Por consiguiente, las partículas del aire no se apilan unas sobre otras a causa de su movimiento constante y rápido. Y surge una nueva pregunta: ¿cómo adquieren energía las partículas del aire? Claro, del sol. El mecanismo por el cual se transfiere la energía del sol a las partículas del aire lo estudiaremos en una sección posterior, de manera que por el momento nos bastará con saber que, simplemente, el sol transfiere energía al aire.

Es un hecho que exponernos al sol da la sensación de *caliente*; esto es, el sol calienta el aire, lo cual es la manifestación de su aumento de energía, por lo que el movimiento de las partículas mencionado antes se denomina comúnmente *movimiento térmico*. Así, cuanto más caliente se encuentre un gas, más rápida y violentamente se moverán sus partículas, y viceversa.

1.1.2 Presión y densidad



Preguntas previas

¿Qué es una fuerza? ¿Cuál es el origen de las fuerzas? ¿Qué es la energía cinética? ¿Cómo se define matemáticamente?



Si pudiéramos ver la estructura molecular del aire, notaríamos una infinidad de moléculas individuales con su movimiento térmico en todas direcciones (figura 1.1). A temperatura ambiente, estas moléculas se mueven con rapidez del orden de los $500 \frac{m}{s}$ (¿a cuánto equivale en kilómetros por hora?); pero chocan entre sí con tanta frecuencia, que avanzan muy poco en una dirección específica. Entre uno y otro choque describen trayectorias prácticamente rectilíneas, ya que la gravedad las afecta muy poco.

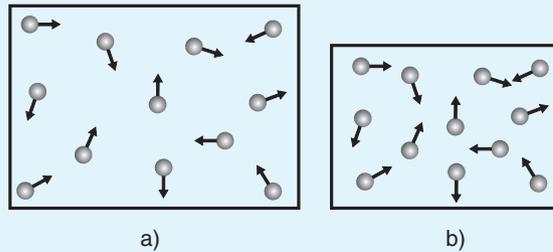


Figura 1.1 a) Las moléculas del aire se mueven en todas direcciones. b) Si se comprime o calienta el gas, aumenta el número de choques por cm^2 .

Aparte de los choques entre ellas, las partículas chocan contra las paredes del contenedor y, en consecuencia, cada una le aplica una fuerza a la pared del contenedor que, aunque la magnitud de cada fuerza individual es muy pequeña, el número de partículas es extraordinariamente grande y, en su conjunto, aplican una fuerza promedio considerable sobre las paredes del contenedor. La magnitud de esta fuerza promedio depende del área de la pared: a mayor área, habrá mayor fuerza, ya que recibe mayor número de choques. Finalmente, como resultado de este análisis, a la fuerza promedio que el aire aplica a cada unidad de área superficial la definimos como *presión*, P :

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

De la definición anterior es evidente que la presión se mide en unidades de fuerza sobre unidades de área, es decir, newton sobre metro cuadrado, combinación que recibe el nombre de pascal, Pa , en honor al científico francés Blaise Pascal. Un pascal es una cantidad pequeña y, para darnos cuenta de ello, tenemos el dato del valor de la presión ejercida por el aire —la presión atmosférica, que es de alrededor de $100,000 Pa$, lo cual significa que la atmósfera aplica una fuerza de $100,000 N$ sobre cada metro cuadrado. Para darnos una idea del tamaño de esta presión, es más o menos igual a la que ejerce un camión de pasajeros sobre el pavimento.

Ejemplo

- Determina la presión aplicada sobre el piso por una persona de 70.0 kg en el área de sus pies, si consideramos que las dimensiones de cada pie son de 27 cm por 10 cm .

Solución:

El área de cada pie es $A = (27 \text{ cm})(10 \text{ cm}) = 270 \text{ cm}^2 = 2.70 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. Y la fuerza aplicada que presiona el piso se identifica con el peso de la persona, es decir, $F = mg = (70.0 \text{ kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) = 687 \text{ N}$; pero, al estar de pie aplica el peso en el área de los dos pies; por lo tanto, la presión es: $P = \frac{F}{A} = \frac{687 \text{ N}}{2(0.027) \text{ m}^2} = 1.3 \times 10^4 Pa$.

Ejemplo

- Un aparato médico portátil de oxígeno incluye un cilindro cuyo volumen es 0.0028 m^3 , y tiene 1.40 m de altura y una presión interna de $1.50 \times 10^7 \text{ Pa}$. ¿Qué fuerza se ejerce sobre las paredes del cilindro?

Solución:

Para el cálculo de la fuerza requerimos el área total del cilindro. Si el volumen total está dado por $\text{área} \times \text{altura}$, entonces: $A = \frac{V}{h} = \frac{0.0028 \text{ m}^3}{1.40 \text{ m}} = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ y de la relación de presión, $F = PA = (1.50 \times 10^7)(2.00 \times 10^{-3}) = 3.00 \times 10^4 \text{ Pa}$.

Ejemplo

- En un taller un gato hidráulico puede aplicar una fuerza de $5.4 \times 10^2 \text{ N}$ en uno de sus pistones de 2.5 cm de radio. ¿Qué presión se ejerce sobre este pistón?

Solución:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{5.4 \times 10^2 \text{ N}}{\pi(2.5 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 2.75 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Ejemplo

- Si en el ejemplo anterior, la presión es transmitida por un fluido incompresible a otro pistón que tiene un radio de 20.0 cm , ¿qué fuerza se puede ejercer en el segundo pistón?

Solución:

De $P = \frac{F}{A}$, se despeja $F = PA = (2.75 \times 10^5 \text{ Pa}) \pi(20.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 3.46 \times 10^4 \text{ N}$.

**Problemas propuestos**

- Coloca tu libro de *Física* en posición vertical y luego horizontal, ¿en cuál de ellas ejerce más presión sobre la superficie?
 - Posición horizontal
 - Posición Vertical
 - Es la misma en cualquier posición

7. Antes de iniciar un viaje, una conductora ajusta la presión de los neumáticos de su automóvil a $1.85 \times 10^5 \text{ Pa}$. Al terminar su viaje en un día caluroso, mide la presión nuevamente y es $2.05 \times 10^5 \text{ Pa}$. ¿En qué factor aumentó la fuerza dentro de cada neumático? No consideres el cambio de área debido a la dilatación del neumático.

Solución:

8. Un cuchillo corta porque:
- | | |
|---|---------------------------------|
| a) Su hoja es de metal | b) Tiene forma de punta |
| c) Actúa sobre una pequeña área de contacto | d) Lo usamos en objetos blandos |

Ya que la presión del aire se produce por los choques entre moléculas y paredes del contenedor, y entre las moléculas y cualquier objeto en contacto con el aire, ella depende de la frecuencia y de la intensidad de los impactos. A mayor frecuencia o intensidad de éstos, mayor será la presión ejercida. Así, para aumentar la presión de un gas dentro de un contenedor, podemos hacer dos cosas: una es aumentar la cantidad de energía cinética interna del gas y la otra es comprimirlo.



¿Cómo aumentar la energía cinética interna del gas? La respuesta es calentándolo o agitándolo. Como lo primero es más sencillo, ése es el proceso que consideraremos. De nuestro curso anterior, *Física 1*, sabemos que la expresión algebraica para la energía cinética es $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. De esta expresión concluimos

que al aumentar la energía cinética en un factor n , la rapidez de las moléculas aumenta en un factor \sqrt{n} . Por ejemplo, si aumentamos al doble la energía cinética, la rapidez aumenta en un factor $\sqrt{2}$. Siendo así, ¿en cuánto aumenta la frecuencia de choques de una molécula contra la pared de un contenedor? Correcto, aumenta en un factor de $\sqrt{2}$. Además, cada molécula golpea la pared del contenedor con una fuerza también aumentada por el mismo factor. Estos cambios en los valores de la frecuencia de choques, y de la intensidad de la fuerza con la que chocan las moléculas contra las paredes del contenedor, provienen del simple aumento en la energía cinética interna.

En el caso de la compresión, al disminuir el volumen, cambiamos una característica importantísima de todas las sustancias: su *densidad*. Se define la densidad

de un objeto, ρ , como la cantidad de materia que tiene en cada unidad de volumen. En lenguaje matemático, en términos de la masa, la densidad se escribe como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2)$$

donde m es la masa del objeto (en este caso el aire) y V el volumen ocupado. De acuerdo con su definición, ¿qué unidades tiene la densidad?

Ejemplo

- La masa de la Tierra es 5.97×10^{24} kg y su radio 6.38×10^6 m. ¿Cuál es su densidad promedio?

Solución:

Usamos el volumen de la esfera, $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(6.38 \times 10^6)^3 = 1.09 \times 10^{21}$ m³ de

donde la densidad es: $\rho \frac{m}{V} = \frac{5.97 \times 10^{24}}{1.09 \times 10^{21}} = 5.48 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$, o bien, $5.48 \frac{gr}{cm^3}$.

Ejemplo

- ¿Cuál es la cantidad aproximada de aire que hay en una casa, cuya área es de 180 m² y 2.50 m de altura? La densidad del aire puede considerarse como $1.29 \frac{kg}{m^3}$.

Solución:

Calculamos el volumen de la casa con $V = Ah = (180 \text{ m}^2)(2.50 \text{ m}) = 450 \text{ m}^3$ y con la relación de densidad, $m = \rho V = (1.29)(450) = 581 \text{ kg}$.

Ejemplo

- Si la densidad del hielo es $0.917 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$, ¿cuál es el volumen de un témpano de masa 3.80×10^5 kg?

Solución:

Despejando $V = \frac{m}{\rho} = \frac{3.80 \times 10^5}{0.917} = 4.14 \times 10^5 \text{ m}^3$.



Problemas propuestos

9. Considera un vaso con agua en la Tierra y otro en la Luna. ¿Cuál opción es correcta para idénticas condiciones del entorno del vaso?
- a) El agua tiene mayor densidad en la Tierra.
 - b) El agua tiene menor densidad en la Tierra.
 - c) Tanto en la Tierra como en la Luna, el agua tiene la misma densidad.
10. Toma entre tus manos dos hojas de papel. Una de ellas arrúgala para darle forma de bola y a la otra no le cambies su forma. Contesta sí o no a las siguientes preguntas:
- a) ¿Cambió de masa? _____
 - b) ¿Cambió de peso? _____
 - c) ¿Cambió de volumen sólo el papel? _____
 - d) ¿Cambió su densidad? _____
11. Las densidades de oro, platino y aluminio son, respectivamente, 19.3, 10.5, 2.7, todas en $\frac{gr}{cm^3}$. ¿Cuál ocupará más volumen para la misma masa?

Solución:

12. ¿En cuánto aumenta de peso un automóvil al llenar su tanque de combustible con 40.0 lt de gasolina, cuya densidad es $0.680 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$?

Solución:

13. Varios objetos de plata son fundidos para hacer un disco artesanal de 1.00 cm de espesor. Si la masa total de los objetos es de 5.00 kg, ¿cuál es el radio del disco?

Solución:

14. Una muestra de concreto de forma irregular tiene en su interior una cavidad esférica de aire formada por una burbuja. ¿Cuál es el radio de la burbuja esférica de aire si la masa de la muestra es de 32.0 kg y el volumen que encierra la superficie irregular es de 0.0255 m^3 ?

Solución:



Problemas Complementarios

1. Los envases de vidrio para bebidas carbonatadas con dióxido de carbono CO_2 requieren ya sea de tapa o tapón con rosca para cerrar el envase. Si la presión dentro del envase es de $25.0 \frac{\text{lb}}{\text{pul}^2}$, ¿qué fuerza debe ejercer el tapón si su área interna es de 0.795 pul^2 ?

Solución:

2. Se tienen bloques de construcción que pesan 3.95 lb y de dimensiones 9.00 plg \times 3.50 plg \times 2.20 plg. ¿Cuántos bloques es necesario poner uno sobre otro como mínimo para que el peso de ellos ejerza la presión de la atmósfera sobre la superficie donde se coloquen?

Solución:

3. Una botella vacía tiene una masa de 24.25 g y de 86.55 g completamente llena con agua. Se vacía el agua y se llena nuevamente con 123.95 g de solvente tetracloruro de carbono. ¿Cuál es la densidad del solvente?

Solución:

4. Un automóvil de masa 1 200 kg tiene en cada neumático una presión de 220 kPa. Si se considera que el neumático es perfectamente flexible y toma la forma del área plana de contacto con el suelo, ¿qué valor tiene dicha área para cada neumático?

Solución:

1.1.3 La atmósfera terrestre



Preguntas previas

¿Qué dice la ley de gravitación universal? ¿Qué es la gravedad? ¿Qué es el peso de un objeto? ¿Qué ecuación se utiliza para calcular el peso?

La atmósfera terrestre es una capa de aire que rodea a la Tierra y tiene un espesor aproximado de 50 km. Sin embargo, la mayor parte de ella se encuentra en una delgada capa, cuyo espesor es de alrededor de 6 km. La atmósfera permanece rodeando a la Tierra a causa de su gravedad. Cada molécula de cada componente químico del aire tiene masa y, en consecuencia, interacciona con la Tierra de acuerdo con la ley de gravitación universal. Esta interacción nos explica el hecho de que la mayoría de la atmósfera se encuentra en la capa de 6 km de espesor. Las moléculas más ligeras como las de hidrógeno y helio, son las que encontramos en las partes altas y ocasionalmente se las arreglan para escapar de la influencia gravitacional y perderse en el espacio. El hecho de que la gravedad terrestre sobre la atmósfera tenga ese efecto tiene consecuencias fundamentales.

Mientras la gravedad “atrae” las moléculas hacia abajo, la presión generada empuja a esas mismas moléculas hacia arriba. Las moléculas caen hacia tierra, pero al hacerlo, incrementan la densidad del aire en las partes bajas, a nivel de la superficie terrestre. Cuanto más se comprime el aire en el mismo volumen, la presión aumentará más. Esta presión es la que soporta la atmósfera y le impide que se colapse sobre la superficie de la Tierra.



Actividad

Una pila de ladrillos. Hay que conseguir algunos ladrillos, digamos unos cuatro o cinco. Si no es posible, algunos libros funcionan de la misma manera. Simplemente hay que apilarlos cuidadosamente, uno sobre otro. Ahora, levanta toda la pila sosteniéndola cuidadosamente del ladrillo (o libro) más bajo. Luego, después de depositarlos nuevamente sobre el piso o la mesa de trabajo, levanta todos excepto el de más abajo, si son cinco ladrillos, levanta los cuatro superiores. Ahora, deposítalos en la pila y levanta los siguientes tres, luego los dos superiores y finalmente el último, el de hasta arriba. ¿Cómo es el esfuerzo realizado en cada operación para levantar ladrillos? ¿Cómo se compara el peso que soporta el ladrillo de hasta abajo con el que soporta el penúltimo hacia arriba?



La atmósfera tiene una estructura esencialmente igual a la de la pila de ladrillos. El aire cerca de la superficie de la Tierra soporta el peso de una columna de varios kilómetros de altura sobre él, originando que su densidad alcance un valor típico de $1.25 \frac{kg}{m^3}$ y una presión de $100,000 Pa$. Sin embargo, al aumentar la altitud, la columna de aire a soportar disminuye de tamaño, por lo que la presión también disminuye con la consecuente disminución de la densidad. El aire en las montañas es menos denso, más “ligero” que a nivel del mar. A cualquier altitud, la presión que ejerce el aire recibe el nombre de *presión atmosférica*.

A partir de la definición matemática de la presión, ecuación 1.1, podemos obtener una expresión matemática para calcular la presión atmosférica. Consideremos una columna de aire, desde algún punto de la Tierra, para la cual el área de su base sea A . La presión sobre la base de la columna de aire es $P = \frac{F}{A}$. Como la fuerza aplicada a la base es igual al peso del aire sobre ella, la presión queda como:

$$P = \frac{mg}{A}$$

De la ecuación 1.2, sustituimos la masa del aire, de manera que nos queda:

$$P = \frac{\rho Vg}{A}$$

donde V es el volumen de la columna de aire, y resulta ser igual a Ah , donde h es la altura de la columna. Con esta relación, calculamos la presión atmosférica mediante la expresión

$$P = \rho gh \quad (1.3)$$



Respecto de la ecuación anterior, ¿cuál es, exactamente, el significado de h ? De acuerdo con la forma en que se encontró tal ecuación, h está relacionada con la altura de la columna de aire que hemos considerado. Supongamos que queremos conocer la presión que actúa sobre la azotea de un edificio, ubicado en la Ciudad de México, que se encuentra aproximadamente a una altura de $2\,000\text{ m}$ sobre el nivel del mar. Lo interesante sería darle solución al problema planteado; para lo cual es necesario considerar algunos otros datos como la superficie de la azotea o la altura del edificio y señalar cuál es el punto de referencia donde se considera la altura del edificio. ¿Cómo considerar h ? Al encontrar la ecuación (1.3) se utilizó el volumen de la columna de aire por encima de la superficie sobre la que se aplica la presión; por consiguiente, h se refiere a la distancia medida desde *lo alto* de la atmósfera, esto es, no se trata de una *altura* medida de abajo para arriba, sino una *profundidad*, medida de arriba hacia abajo.

Con estas discusiones nos encontramos en posición de contestar las preguntas previas a esta sección 1.1, excepto la última, *Si pudiésemos llevar un globo lleno con helio a la luna, donde no hay aire, y lo soltásemos, ¿en qué dirección se movería?* Esta pregunta la contestaremos después de estudiar la siguiente subsección.

Ejemplo

- Calcula la presión ejercida por el agua contenida en una fosa de clavados de plataforma, cuya profundidad es de 10.0 m.

Solución:

En este ejemplo, la profundidad del agua es la altura h de la columna de agua que se soporta en el fondo. Con $g = 9.8 \frac{m}{s^2}$ y la densidad del agua, calculamos la presión: $P = \rho gh = (1.00 \times 10^3)(9.8)(10.0) = 9.8 \times 10^4 Pa$.

Ejemplo

- Considerando la sangre como un fluido estático (como aproximación), ¿qué diferencia de presión existiría entre un punto P_1 de la aorta, cercana al corazón, y el punto P_2 en la arteria tibial que llega al talón del pie en posición vertical, para una persona en que la distancia entre estos dos sitios es de 1.40 m? La densidad de la sangre es $1\,060 \frac{kg}{m^3}$ a la temperatura corporal.

Solución:

La separación vertical entre el corazón y el talón nos da la altura del fluido responsable de la diferencia de presión entre los dos puntos a considerar. Como el corazón mantiene cierta presión en la aorta, entonces la presión hidrostática adicional es:

$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho gh = (1\,060)(10)(1.40) = 1.48 \times 10^4 Pa$. Como comentario adicional, en posición horizontal (la persona acostada) la diferencia de alturas entre las dos arterias es despreciable, ¿habrá diferencia de presión?



Problemas propuestos

15. Algunos alimentos enlatados en conserva con tapa metálica tienen una parte de ella sumida respecto del resto de ella (un botón rojo). ¿Qué está ejerciendo la presión sobre ella?

- a) El alimento que se encuentra dentro del recipiente.
- b) La columna de aire que está sobre la tapa.

16. Expresa la presión atmosférica $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, en a) $\frac{\text{lb}}{\text{pul}^2}$ y b) en la correspondiente a la altura en mm de una columna de mercurio *Hg*.

Solución:

17. Para medir la presión sanguínea del cuerpo humano, ¿en qué sitio es más correcta la medición?

- a) Cuello
- b) Antebrazo
- c) Muñeca
- d) Cerca del tobillo

18. En las granjas o ranchos es común ver tanques elevados que abastecen de agua a los alrededores. Si el tanque está construido de madera con cinchos de refuerzo a su alrededor, ¿a qué altura del recipiente es necesario colocar mayor número de cinchos?

- a) En la parte superior
- b) En la parte inferior
- c) No importa, igualmente espaciados

19. Para explorar las grandes profundidades del mar se utilizan sumergibles a control con cámaras de observación. La falla marina Mariana en el Océano Pacífico tiene más de 10 000 m de profundidad. Si la densidad del agua de mar es $1.025 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a) ¿qué presión se ejerce a esta profundidad? b) ¿Qué fuerza debe soportar la lente ocular de la cámara si su radio es de 11.0 cm. c) Compara esta fuerza con el peso de un barco de $1.0 \times 10^5 \text{ kg}$.

Solución:

20. Un arreglo común para introducir suero ($\rho = 1.030 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) al cuerpo, es desde un recipiente con el suero a la altura requerida para que se introduzca en la vena deseada, usando una manguera flexible unida a una aguja y controlando su flujo continuo. ¿Qué presión ejerce el suero, si la altura de la superficie del líquido se coloca a una altura de 75.0 cm? ¿Qué fuerza se ejerce en la punta de la aguja dentro de la vena si su radio es 0.19 mm?

Solución:

21. La lectura en mm de Hg para la presión atmosférica en el nivel más alto de un edificio es 745.0 y a nivel del suelo es 760.0 mm. Si la densidad del aire es $1.290 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y la consideramos constante, ¿cuál es la altura del edificio?

Solución:



Problemas complementarios

5. Considera tres columnas de la misma altura h de agua, agua salada y mercurio, tanto en la Tierra como en la Luna, y contesta lo siguiente:
- a) ¿Ejercerían la misma presión en la base de ellas en la Tierra? ¿Y en la Luna?

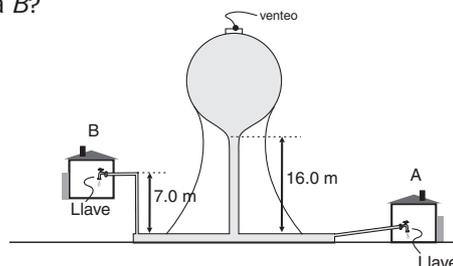
b) Respecto del inciso anterior, ¿cuál de ellas ejercería mayor presión en cada sitio astronómico?

c) Para la que ejerce mayor presión en cada sitio astronómico, ¿dicha columna ejercería la misma presión en cada sitio astronómico?

d) Si no ejercen la misma presión, entonces, ¿en dónde se ejerce más presión, en la Tierra o en la Luna?

e) ¿A qué se debe esta diferencia?

6. El tanque de suministro de agua del Enterprise Ranch es esférico y está conectado, como se ilustra en la figura, a varias casas. Se encuentra venteadado a la atmósfera en la parte superior y completamente lleno con 5.30×10^5 kg de agua. Sin considerar la tubería, ¿qué presión existirá tanto en la casa A como en la casa B?



Solución:

7. Un tubo de ensayo sostenido en forma vertical contiene cierto volumen de aceite que se muestra con una altura de 2.50 cm y de $\rho = 0.815 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$. Por debajo del aceite hay 7.00 cm de agua. ¿Cuál es la presión en el fondo del tubo?

Solución:

La ecuación (1.3) es aplicable a todos los fluidos y no solamente a la atmósfera. En el caso general de aplicación a cualquier fluido confinado dentro de un contenedor, nos referiremos a tal presión con el nombre de presión hidrostática. Para comprenderla más a fondo en el caso más general, consideremos lo siguiente.



La presión dentro de una alberca, un lago o el mar, aumenta cuanto mayor sea la profundidad a la que nos sumergimos. En algunas ocasiones, basta con sumergirse poco más de un metro para sentir el efecto de la presión del agua en los oídos. De forma semejante, en la atmósfera la presión disminuye con la altura a la que subimos, e influye, además, el cambio en la densidad que hemos analizado anteriormente. Dentro del agua, cuya densidad permanece constante en todo su volumen, sucede algo diferente.

Consideremos un contenedor lleno con agua (o cualquier otro líquido), abierto en la parte superior, como se muestra en la figura 1.2.

La base del contenedor soporta una presión ocasionada por el peso de la columna de agua sobre ella, más la presión atmosférica. El peso de la columna de agua resulta ser:

$$W = mg = \rho Vg = \rho Ahg$$

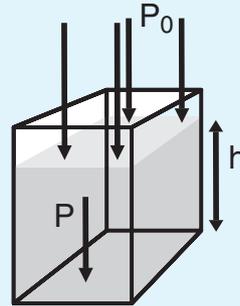


Figura 1.2 Un contenedor rectangular con un fluido hasta la altura h .

Ahora, si P_0 es la presión en la parte superior (atmosférica) de la columna de agua, y P la presión en la parte inferior, la presión total sobre la base del contenedor será $P - P_0$, de donde la fuerza neta sobre el fondo será $PA - P_0A$. La condición de equilibrio hidrostático, esto es, que el fluido permanezca en reposo dentro del contenedor, exige que esta fuerza neta sea igual al peso de la columna de agua, de donde:

$$PA - P_0A = \rho Ahg \Rightarrow P = P_0 + \rho gh \quad (1.4)$$

El resultado anterior, referente a que la presión a una profundidad h en un líquido confinado en un contenedor es mayor que la presión sobre su superficie, es válida para cualquier contenedor, así sea éste la Tierra que contiene al mar.

Ejemplo

- Calcula la presión a una profundidad de 10.00 metros por debajo de la superficie del mar. La presión atmosférica al nivel del mar es de 1 atmósfera.

Solución:

$P_0 = 1 \text{ atm} = 101 \text{ kPa}$, $\rho = 1.025 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, y $g = 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$. Después de sustituir los valores en la ecuación (1.4), obtenemos directamente que $P = 1.996 \text{ atm}$. Esto es, a 10 metros la presión es prácticamente del doble de la presión atmosférica.

1.1.4 Flotación



Preguntas previas

¿Qué establece la tercera ley de Newton? ¿Qué son precisamente una acción y una reacción?



Actividad previa

Consigue una piedra común cuyo peso sea lo suficientemente grande como para que sientas cierto esfuerzo muscular para sostenerla con una mano. Ahora, sumérgela, sosteniéndola con la mano, dentro de un recipiente con agua. ¿Cómo sientes ahora el esfuerzo en tu brazo para sostener la piedra sumergida en el agua? ¿Mayor, menor o no sientes cambio?



Cuenta la historia que Arquímedes, un matemático y científico griego que vivió en Siracusa entre los años 287 y 212 a. C. fue capaz de medir la densidad de objetos de forma complicada. De acuerdo con la leyenda, el rey de Siracusa había encargado a sus orfebres la fabricación de una corona de oro. Cuando la tuvo en su poder, empezó a sospechar que los artesanos no habían utilizado todo el oro que les había proporcionado, guardándose para sí cierta cantidad de él. Para probar si hubo o no fraude, el rey le encargó a Arquímedes que lo averiguara pero *sin destruir la corona*. Menudo problema. Arquímedes se dio a la tarea de encontrar la respuesta y, continúa la leyenda, descubrió la manera de hacerlo mientras tomaba un baño de tina. Tal fue su alegría de descubrirlo que se salió de la tina y corrió por las calles de Siracusa gritando: “¡Eureka, eureka!” (“¡Lo he descubierto, lo he descubierto!”).

La cuestión es que los historiadores no relatan que fue exactamente lo que hizo. Una posibilidad es que al sumergirse en la tina, se dio cuenta de que el nivel del agua subía y, si la tina estaba llena hasta el borde, el agua se derramaba. Por consiguiente, podía medir el volumen de un objeto de forma irregular por medio del volumen de agua que desplazaba al sumergirlo en ella. Si encontró el volumen de la corona de esta manera, podía pesarla y calcular así su densidad. Después calcularía de la misma manera la densidad del oro puro y la compararía con la obtenida para la corona.

Al descubrir este fenómeno, Arquímedes también observó que si sostenía un objeto con la mano, al sumergirlo en agua realizaba un esfuerzo menor para sostenerlo. De estas observaciones, Arquímedes concluyó que existía algo que “empujaba” al objeto hacia arriba para hacerlo menos pesado, con lo cual se llega a establecer un enunciado importante dentro de la hidrostática, denominado *principio de Arquímedes*, que afirma lo siguiente:

Un objeto parcial o totalmente sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical hacia arriba, cuya magnitud es igual al peso del volumen del fluido desplazado por el objeto.

La fuerza a la que se refiere este enunciado recibe el nombre de *fuerza boyante* o *fuerza de flotación*. Encontrar una expresión matemática para el principio de Arquímedes equivale a encontrar una expresión para la fuerza boyante. Para tal finalidad partimos del hecho de que podemos calcular el peso de un objeto (en este caso, el fluido desplazado por el objeto) mediante la ecuación empleada para la fuerza gravitacional, $F = mg$, donde m representa la masa del fluido desplazado. De la ecuación (1.2), $m = \rho_f V_d$, donde ρ_f representa la densidad del fluido en el que se sumerge el objeto y V_d el volumen de fluido que el objeto desplaza al sumergirse parcial o totalmente en el fluido. Al sustituir en la ecuación que utilizamos para calcular el peso, ésta se interpreta como la fuerza boyante, F_b :

$$F_b = \rho_f V_d g \quad (1.5)$$

Es importante resaltar que, por su origen, todos los parámetros involucrados en esta expresión se refieren al fluido en el que se sumerge el objeto. En la tabla 1.1 siguiente se presentan algunos valores de la densidad de diferentes sustancias.

Tabla 1.1 Densidades de algunas sustancias a $T = 0^\circ \text{C}$ y $P = 1 \text{ atm}$

Sustancia	Densidad en $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Agua	1.00×10^3
Agua de mar	1.025×10^3
Mercurio	13.6×10^3
Hielo	0.917×10^3
Plomo	11.3×10^3
Oro	10.3×10^3



Actividad

Observación de la fuerza boyante. Para esta actividad es necesario contar con una báscula sensible como las que se encuentran en los laboratorios de química, y un vaso parcialmente lleno con agua. Coloca el vaso sobre la báscula y registra la lectura de la lectura. Introduce un dedo en el agua y observa si cambia la lectura. Con los datos obtenidos, puedes calcular el volumen sumergido del dedo. ¿Por qué cambia la lectura de la balanza?²

² Cuando se sumerge el dedo en el agua, éste experimenta una fuerza boyante dada por la ecuación 1.4. La reacción a esta fuerza, de acuerdo con la tercera ley de Newton, debe manifestarse como un aumento en la lectura de la escala.

De la misma manera encontramos el peso del objeto en el aire, esto es, antes de sumergirlo en un fluido distinto del aire por la ecuación $F_o = \rho_o V_o g$, donde los subíndices se refieren al objeto. Esta última expresión la denominaremos el peso real del objeto el cual, junto con la ecuación (1.5), nos brinda un nuevo concepto, el de *peso aparente*. Recordando la actividad inicial de esta unidad, es evidente que el esfuerzo para sostener la piedra sumergida en agua es menor; es decir, el peso de la piedra dentro del agua es menor que fuera de ella. Esto es lo que significa el concepto de peso aparente. Por consiguiente, para calcular el peso aparente de un objeto basta con restar la fuerza boyante del peso real:

$$W_a = F_o - F_b \quad (1.6)$$

donde W_a representa el peso aparente.



Actividad

Medición de la fuerza boyante. Necesitamos un dinamómetro o una balanza de resorte como las que a veces observamos en los mercados. Suspende de ella un objeto, por ejemplo, la piedra de la actividad inicial, y toma la medición del peso que marca. Sumerge ahora el objeto en agua, suspendido de la balanza, y observa el nuevo resultado en la medición, el cual es el peso aparente del objeto. Utiliza la ecuación 1.5 para encontrar el valor de la fuerza boyante.

Y todavía más. Para la ecuación (1.6) tenemos tres posibilidades: que la fuerza boyante sea menor, igual o mayor que el peso real del objeto. En el primer caso, la dirección del peso aparente es hacia abajo, situación en la que el objeto se hunde por sí solo en el fluido. En el segundo caso, al haber equilibrio entre las dos fuerzas, el peso aparente es cero y el objeto se quedará suspendido en cualquier punto en que se coloque. Esto es, si colocamos un objeto para el que se cumpla esta condición, a la mitad de la profundidad en un contenedor, el objeto permanecerá ahí. Para el tercer caso, el peso aparente se vuelve negativo. ¿Tiene algún significado físico un *peso* negativo? Recordemos que el peso se definió como *lo que marca la báscula* (o balanza o cualquier otro dispositivo semejante).



Entonces, ¿tiene coherencia un resultado negativo para el *cálculo* del peso? El punto fino se encuentra precisamente en eso: éste es un peso *calculado*, no medido. Como en este caso (calcular) el peso es una cantidad vectorial que proviene de la fuerza gravitacional, un resultado negativo se interpreta como una fuerza en sentido contrario a la fuerza gravitacional, de ahí que la fuerza boyante haya sido enunciada anteriormente con dirección vertical hacia arriba. Por la segunda ley de Newton, en este caso, un objeto sumergido en un fluido, dentro del cual la fuerza boyante sea mayor que su peso real, se acelerará en dirección vertical hacia arriba. Tenderá a *flotar*. Para las preguntas previas de la unidad, ésta es la explicación del hecho afirmado de que el aire es lo que hace subir a un globo lleno con helio. El globo está sumergido en la atmósfera —un fluido— y la fuerza boyante es mayor

que su peso real —peso del globo vacío + peso del helio contenido—, por lo que se acelera hacia arriba. La condición de flotación se puede expresar, matemáticamente, por la relación:

$$F_b \leq F_o, \text{ equivalente, } \rho_f \geq \rho_o.$$



Pregunta

Todas las personas nos encontramos sumergidas en un fluido, el aire. ¿Por qué no flotamos? Calcula la fuerza boyante para una persona promedio que desplaza 0.080 m³ de aire. ¿Sería mayor, menor o igual que el peso típico de una persona (¡en NI)?

Ahora, regresemos a la pregunta inicial que nos quedó pendiente. Si pudiésemos llevar un globo lleno con helio a la Luna, donde no hay aire, y lo soltásemos, ¿en qué dirección se movería? ¿Cuál es tu respuesta?

Ejemplo

- Una balsa rectangular de madera de 4.0 m × 3.0 m y 25.0 cm de espesor se lanza al agua en una laguna. ¿Cuánto se hunde la balsa en el agua debido sólo a su peso? ¿Cuánto peso adicional soportaría sin hundirse?

Solución:

Primero es necesario saber si la balsa flota comparando su peso con la máxima fuerza boyante sobre ella, para lo cual se necesita la densidad de la madera,

$$\rho_{mad} = 555 \frac{kg}{m^3}, \text{ y el peso real de la balsa es: } F_o = \rho_o V_o g = (555)(4.0)(3.0)(0.250)$$

(10) $F_o = 1.7 \times 10^4 \text{ N}$. Ahora, la máxima fuerza boyante o de flotación se da si la balsa se hunde completamente, desplazando un volumen igual de agua; entonces, dicha fuerza es $F_b = \rho_f V_d g = (1.00 \times 10^3)(4.0)(3.0)(0.250)(10) = 3.0 \times 10^4 \text{ N}$, siendo mayor que el peso de la balsa; por lo tanto, la balsa flota, pero sin hundirse completamente, y desplaza sólo el volumen que sustenta su peso al hundirse parcialmente. El máximo peso adicional que soportaría sería la diferencia entre ambas: $F_b - F_o = 1.3 \times 10^4 \text{ N}$.

Ejemplo

- Antiguamente, los dirigibles eran un medio de transporte aéreo que en la actualidad se utilizan para comercialización y suelen verse en eventos deportivos o espectáculos. Considera un dirigible lleno con gas helio y volumen de 5450 m³,

$$\rho = 0.178 \frac{kg}{m^3}. \text{ Si el dirigible se mantiene a una altitud constante de 500 m sobre}$$

un estadio de fútbol donde las condiciones del aire circundante son tales que su densidad es $1.19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, ¿cuál es la fuerza de flotación sobre el dirigible? ¿Cuánto peso (carga) soporta en estas condiciones?

Solución:

El dirigible se encuentra a altura constante, lo que quiere decir que está en equilibrio y dentro de un fluido, el aire. En esta condición $F_b = F_o$; sin embargo, el peso real debe ser la suma del peso del dirigible F_{dir} más la carga F_{car} : $F_o = F_{dir} + F_{car}$. Entonces:

$F_b = \rho_f V_d g = (1.19)(5450)(10) = 6.49 \times 10^4 \text{ N}$, es el empuje ascendente total. Ahora, para calcular el peso real del dirigible sin el peso adicional de carga soportada,

$F_{dir} = \rho_o V_o g = (0.178)(5450)(10) = 9.70 \times 10^3 \text{ N}$; con este dato finalmente obtenemos: $F_{car} = F_o - F_{dir} = F_b - F_{dir} = (6.49 \times 10^4) - (9.70 \times 10^3) = 5.52 \times 10^4 \text{ N}$, como peso máximo.

Ejemplo

- Un material metálico se suspende de una balanza de resorte que da una lectura de 930 N. Enseguida se hunde totalmente en un recipiente con agua, dando una lectura de 760 N. ¿Cuál es la densidad del material?

Solución:

Al sostenerse con la balanza en el aire tenemos el peso real del material. Una vez que se hunde en agua, muestra el peso aparente, ya que se ejerce empuje del fluido. Despejando la fuerza boyante: $F_b = F_o - W_a = (930) - (760) = 170 \text{ N}$. Como el volumen desalojado de agua, V_d , es igual al volumen del material V_o , despejamos de $F_b = \rho_f V_d g$

$$V_d = V_o = \frac{F_b}{\rho_f g} = \frac{170}{(1.00 \times 10^3)(10)} = 0.017 \text{ m}^3.$$

Del peso real obtenemos ahora la densidad del material:

$$\rho_o = \frac{F_o}{V_o g} = \frac{930}{(0.017)(10)} = 5.47 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$



Problemas propuestos

22. Analiza los enunciados siguientes y contesta falso o verdadero:
- Todo objeto que flota en el mercurio, también lo hace en el agua ____.
 - Todo objeto que flota en el agua, también lo hace en el mercurio ____.

28. ¿Cuál es el número (entero) de ramas circulares de madera con diámetro de 16.0 cm y 3.50 m de longitud, que son necesarias para construir una balsa que soporte a seis personas de 75.0 kg cada una y una carga adicional de 250 kg?

Solución:



Problemas complementarios

8. El peso del cerebro humano es de alrededor de 15 N y se encuentra sumergido en líquido cefalorraquídeo dentro del cráneo. El líquido ejerce una fuerza boyante de 14.6 N aproximadamente. ¿Cuál es el peso del líquido cefalorraquídeo aproximadamente?
- a) 15 N b) 0.4 N c) 14.6 N d) Se requieren más datos
9. El planeta Vulcano tiene una aceleración gravitacional de la mitad de la Tierra. El señor Spock (nativo del lugar) decide nadar en Chapala. ¿Cómo será la fuerza boyante sobre él comparada con la ejercida en la Tierra?
- a) El doble b) La mitad c) Sería del mismo valor
10. Una moneda antigua está hecha con una aleación de plata y cobre con masa de 11.55 gr. Su peso dentro del agua es 0.1012 N. Determina el porcentaje de cada metal en la aleación. Las densidades de la plata y cobre son, respectivamente, 1.05×10^4 y 8.89×10^3 , ambas en $\frac{kg}{m^3}$.

Solución:

11. Una pieza metálica tiene un volumen de 160 cm^3 y masa de 1.40 kg .
- ¿Cuál es su peso?
 - ¿Cuál será la fuerza boyante sobre ella al hundirla completamente en agua?
 - ¿Cuál es su peso aparente en el agua?
 - ¿Cuál será su peso aparente si se sumerge completamente en agua de mar?

Solución:

12. Un juguete de plástico cuyo peso real es 3.10 N muestra un peso aparente de 1.50 N , hundido completamente en agua. Calcula:
- La fuerza boyante ejercida por el agua sobre el juguete.
 - El volumen del juguete.
 - La densidad del plástico que se usó para fabricarlo.

Solución:

1.1.5 El principio de Pascal

Blaise Pascal (1623-1662), científico, filósofo y teólogo, hizo un descubrimiento que llevaría a la invención de algunos dispositivos hidráulicos de uso común. Pascal utilizó un barril de aquellos que existían en su época. A tal barril previamente lo llenó con agua, y en una de sus tapas le conectó un tubo de longitud considerable en posición vertical (figura 1.3). Luego, vaciando agua dentro del tubo, pudo demostrar que la sola presión del agua —la ya discutida presión hidrostática— de la columna dentro del tubo era suficiente para reventar el barril. Con este experimento probó que la presión hidrostática se ejerce en todas direcciones dentro de un contenedor, aun en dirección vertical hacia arriba.

De esta manera, Pascal enunció el principio que lleva su nombre:



Figura 1.3 Esquema del barril de Pascal.

La presión dentro de un líquido confinado en un contenedor se transmite en todas direcciones con la misma intensidad.

Es claro que este principio tiene como fundamento la incompresibilidad de los líquidos como el agua.



La aplicación inmediata del principio de Pascal la encontramos en la prensa hidráulica, la cual, en su forma más elemental, consiste en dos tubos conectados entre sí, provistos cada uno de un émbolo o pistón y llenos de agua o aceite (figura 1.4). Uno de los tubos tiene un área de sección recta menor que el otro. Así, si le aplicamos una fuerza F_1 al émbolo menor, se producirá una presión sobre el agua que se transmitirá al otro émbolo con la misma intensidad.

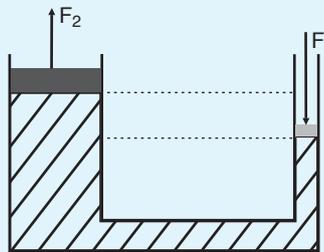


Figura 1.4 Esquema del funcionamiento de una prensa hidráulica.

Es decir, la presión en el émbolo menor es igual a la presión del émbolo mayor, de tal forma que matemáticamente podemos expresar la relación de la siguiente manera:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

donde A_1 y A_2 son las áreas del émbolo pequeño y el émbolo grande, respectiva-

mente. De la última expresión, encontramos la fuerza sobre el émbolo mayor:

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

Ahora, como A_1 y A_2 , el cociente entre ellas es mayor que 1, por lo que la fuerza F_2 será mayor que la fuerza F_1 en la proporción que indique esta relación. En otras palabras, lo que hace la prensa hidráulica es *multiplicar* el valor de la fuerza aplicada.

Ejemplo

- Una compactadora de basura tiene una prensa hidráulica. El pistón para ejercer la fuerza de entrada tiene un radio de 1.0 cm y el émbolo de salida tiene un radio de 10.0 cm. Si no hay diferencia en las alturas de los émbolos inicialmente, ¿qué fuerza es necesario aplicar al émbolo de entrada para que el de salida obtenga una fuerza de 400.0 N?

Solución:

El área del émbolo pequeño es: $A_1 = \pi R_1^2 = \pi(1.0)^2$, el área del grande es:

$A_2 = \pi R_2^2 = \pi(10.0)^2$, al despejar F_1 queda: $F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 = \frac{\pi(1.0)^2}{\pi(10.0)^2} 400 = 4.00 \text{ N}$, que es la fuerza requerida.



Problemas propuestos

28. Si en una prensa hidráulica el área del pistón más grande es del doble del área del pistón pequeño, ¿qué fuerza puede aplicarse con el pistón grande si en el pequeño se aplican 30.0 N?

Solución:

29. Sobre un pistón pequeño de un sistema hidráulico de área transversal de 0.0550 m^2 se aplica una fuerza de 25.0 N . ¿Cuál es la magnitud del peso que puede ser levantado por el otro pistón de área transversal de 0.1500 m^2 ?

Solución:

30. Un gato hidráulico para levantar autos y camionetas, denominado “gato de tres toneladas”, tiene 24 mm de diámetro en su pistón grande y 6.5 mm en el pequeño. Si tres toneladas equivalen a una fuerza de $3.0 \times 10^4 \text{ N}$, ¿qué fuerza debe aplicarse sobre el pistón pequeño para levantar un peso de tres toneladas?

Solución:



Problema complementario

13. Las sillas de los odontólogos son sistemas hidráulicos. Si una silla pesa 1650 N y se encuentra sobre un pistón de área transversal de 1440.0 cm^2 , ¿qué fuerza se debe aplicar al pistón pequeño de área 73.0 cm^2 para elevar la silla?

Solución:

1.1.6 Medición de la presión



Preguntas previas

¿Qué es la presión atmosférica? ¿Qué es la presión hidrostática?

Para medir la presión hidrostática se utilizan dispositivos denominados manómetros; mientras que para medir la presión atmosférica se utilizan los barómetros. Ambos están calibrados en unidades de presión, como pascales, atmósferas o milímetros de mercurio (mmHg). En unidades del sistema inglés, la unidad de uso común es la libra por pulgada cuadrada, $\frac{lb}{plg^2}$.

La figura 1.5 ilustra un barómetro simple. Un tubo de vidrio de longitud mayor que 76 cm, cerrado en uno de sus extremos, se llena con mercurio y se coloca boca abajo dentro de un recipiente (tipo plato) también con mercurio. Al nivel del mar, se observa que el mercurio dentro del tubo baja hasta que su nivel queda a 76 cm sobre la superficie del mercurio en el plato. El espacio que queda dentro del tubo por arriba del nivel de mercurio está al vacío —a excepción quizá, de algo de vapor de mercurio. ¿Por qué sucede esto? ¿Por qué no se vacía el tubo?

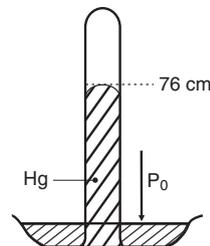


Figura 1.5 Esquema de un barómetro simple.

El mercurio en el tubo ejerce una presión hidrostática sobre el mercurio del plato, al tiempo que la atmósfera también ejerce una presión sobre el mismo mercurio del plato. El mercurio deja de bajar cuando la presión hidrostática se iguala a la presión atmosférica.



Preguntas

¿Podría utilizarse agua en lugar de mercurio para fabricar un barómetro? ¿De qué altura deberá ser el tubo?³

³ Sí podría hacerse; la longitud del tubo deberá ser 13.6 veces más largo que para el caso del mercurio, ya que se necesita 13.6 veces más agua que mercurio para producir la misma presión hidrostática (por los valores de las respectivas densidades). Entonces, la altura deberá exceder un poco a $13.6 \times 0.76 = 10.3$ metros.

*Cuando bebemos agua o bebidas gaseosas usando un popote, ¿qué es exactamente lo que hace posible que funcione el popote?*⁴

La figura 1.6 muestra el esquema de un manómetro de tubo abierto. Este tipo de manómetros se conforma por un tubo en forma de “U” que mide la presión con base en la diferencia de alturas en sus dos brazos. La parte abierta del tubo se encuentra en contacto con la atmósfera, por lo que la presión atmosférica, P_o , está aplicada en la superficie del líquido dentro del manómetro. La otra parte del tubo se encuentra conectada al contenedor donde se desea medir la presión P , denominada *presión absoluta*. Así, la *presión manométrica*, P_m se encuentra por la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica:

$$P_m = P - P_o = \rho gh$$

donde ρ es la densidad del fluido dentro del tubo. A este fluido se le da el nombre de fluido manométrico.

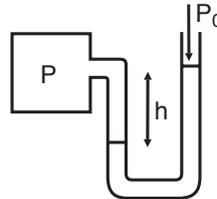


Figura 1.6 Manómetro de tubo abierto para medir la presión ρ .

Ejemplo

- Calcula la presión absoluta y la presión manométrica en el extremo inferior de un tubo vertical de 50.0 m que contiene agua.

Solución:

La presión ejercida en el extremo superior del tubo es la presión atmosférica, cuyo valor es $P = 1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$. La presión manométrica se debe a la columna de agua. Entonces, $P_m = \rho gh = (1.00 \times 10^3)(10)(50.0) = 5.0 \times 10^5 \text{ Pa}$. Con estos datos calculamos la presión absoluta: $P = P_m + P_o = (5.0 \times 10^5) + (1.00 \times 10^5) = 6.0 \times 10^5 \text{ Pa}$.

⁴ Al sorber por el popote se reduce la presión dentro de éste; entonces, la presión atmosférica sobre la superficie de la bebida literalmente empuja al líquido hacia dentro del popote. Hablando estrictamente, no sorbemos el agua, sino que la presión atmosférica la empuja hacia arriba.



Problemas propuestos

31. Si la presión manométrica aumenta en un factor de dos, ¿qué ocurre con la presión absoluta?
- a) Disminuye a la mitad b) Aumenta al doble c) No se modifica
32. Si la presión atmosférica corresponde a 760 mm de Hg, ¿cuál es su valor en pulgadas de Hg?

Solución:

33. La presión en la superficie de un lago es la atmosférica. ¿A qué profundidad la presión es del doble de la atmosférica?

Solución:

1.1.7 Tensión superficial



Actividad previa

Para esta actividad necesitarás una buena cantidad de monedas de diez centavos o de veinte centavos (las primeras son mejores para nuestros propósitos) y un vaso casi lleno con agua. La actividad consiste en dejar caer cuidadosamente las monedas (no de canto) en la superficie del agua hasta que la totalidad de ellas se hunda. ¿Cuántas monedas crees poder colocar antes de que ocurra el hundimiento? Realiza la actividad. ¿Se cumple tu predicción? ¿Por qué las monedas pueden permanecer sobre la superficie sin hundirse?



Las pompas de jabón se forman esencialmente por acción de la tensión superficial.

Cuando los átomos o moléculas de una sustancia se encuentran muy cercanos entre sí, digamos a distancias del orden de 10^{-10} m, aparece un tipo de fuerzas de atracción no consideradas por nuestro estudio anterior de las tres leyes de Newton, conocidas genéricamente como *fuerzas moleculares*. Las moléculas cercanas a la superficie de un líquido experimentan este tipo de fuerzas, las cuales tienen la característica de ser simétricas; esto es, dentro del seno del líquido las moléculas experimentan fuerzas de atracción en todas direcciones: para una fuerza aplicada en una dirección siempre encontraremos otra aplicada en la dirección exactamente opuesta. En eso consiste la simetría. Estas fuerzas reciben el nombre de *fuerzas de cohesión*, que, como se menciona al inicio de la subsección, son fuerzas de corto alcance entre átomos y moléculas. La naturaleza y el origen de estas fuerzas están relacionados con fenómenos electromagnéticos que estudiaremos en la unidad 3.

En la superficie del líquido se pierde la simetría de las fuerzas de cohesión; una molécula de la superficie del líquido experimenta la fuerza cohesiva *netamente* solamente en dirección hacia abajo y, en consecuencia, presiona las moléculas que se encuentran inmediatamente por debajo de ella. Las moléculas superficiales no se aceleran como pensaríamos, ya que la fuerza cohesiva se encuentra en equilibrio con la reacción que le aplica las moléculas inmediatamente por debajo de ellas, en respuesta a la presión ejercida. En la actividad previa con agua y monedas puede inferirse que las monedas presionan la superficie del agua, ocasionando que ésta “se estire”. Las fuerzas cohesivas, cuya dirección de aplicación está sobre la superficie, impiden la separación de las moléculas, por lo que provocan que la superficie del agua se comporte como si fuera una membrana elástica (o una “telita”). Esta propiedad de todos los líquidos se denomina *tensión superficial*, la que por tener su origen en las fuerzas de cohesión superficiales, depende también de la anchura de la superficie que se estira. Así, las unidades en que se mide la tensión superficial son newtons aplicados por cada metro de anchura de superficie, $\frac{N}{m}$. En la tabla 1.2 presentamos algunos valores de tensión superficial.

Tabla 1.2 Tensiones superficiales de algunos líquidos a temperatura ambiente en contacto con el aire.

Líquido	$\frac{N}{m}$
Agua	0.073
Tetracloruro de carbono	0.027
Alcohol etílico	0.022
Mercurio	0.49

La tensión superficial tiene una gran cantidad de efectos que observamos con mucha frecuencia en la vida cotidiana. La tensión superficial es la responsable de que el volumen de cualquier líquido tienda a disminuir su área superficial. Las gotas de agua en el aire adquieren su forma esférica por ella, ya que la esfera es la figura geométrica para la que la relación área-volumen encerrado es la mayor; esto es, el máximo volumen encerrado por el área mínima. La tensión superficial del mercurio es tan grande que, el mercurio sobre una superficie abierta forma gotas pequeñas de esfericidad casi perfecta (aplanada en la parte inferior); el mismo efecto se observa con el agua si se esparce, por ejemplo, sobre papel encerado.

Por otro lado, la tensión superficial se manifiesta cuando los líquidos se encuentran dentro de un contenedor. Entre el líquido y el sólido (las paredes del contenedor) en contacto también aparecen fuerzas semejantes a las fuerzas cohesivas; pero aparecen por la interacción entre las moléculas del líquido y las del sólido. A tales fuerzas se les da el nombre de *fuerzas de adhesión*. Como consecuencia de las interacciones entre moléculas, y entre moléculas y una superficie sólida, la superficie del agua se alinea de manera perpendicular a la resultante de esas fuerzas, ya que de otra manera las moléculas superficiales se moverían a lo largo de la superficie sólida.

Para la resultante de las fuerzas y la alineación molecular del líquido, encontramos tres casos (figura 1.7): a) La fuerza de adhesión es lo suficientemente intensa como para producir una curvatura hacia abajo en la superficie del líquido, situación observable cuando el líquido (especialmente el agua) se encuentra en contacto con vidrio. Para describir este comportamiento, decimos que el líquido mojó el vidrio. b) La fuerza de adhesión es pequeña y la fuerza resultante sobre el líquido en la unión con el sólido tiene dirección hacia dentro del líquido, con lo que se produce una curvatura hacia arriba en la superficie del líquido, es decir, una situación que se observa entre el mercurio y el vidrio. c) La resultante de las fuerzas de adhesión y cohesión es paralela a la superficie del contenedor, por lo que la superficie del líquido queda perpendicular a la superficie del sólido. Éste es el caso del agua en un contenedor de plástico; decimos que el agua no moja el plástico.

Dentro de un tubo cilíndrico, la superficie curva del líquido se denomina *menisco*. Para que se forme un menisco es necesario que la orilla del líquido suba o baje alguna distancia a lo largo de la superficie sólida, fenómeno conocido como *capilaridad* (un *capilar* es un tubo de diámetro pequeño). La tensión superficial em-

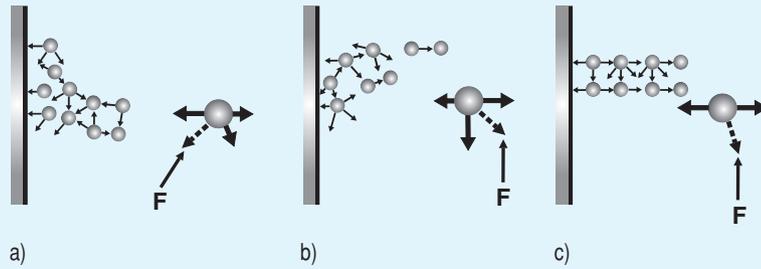


Figura 1.7 Resultantes de adhesión y cohesión sobre moléculas superficiales. La fuerza F es la fuerza neta sobre las moléculas de la superficie cercanas a la pared del tubo o contenedor.

puja una columna de agua hacia arriba en un tubo de vidrio y empuja hacia abajo una columna de mercurio en un tubo de vidrio. De ahí las formas de los meniscos descritos en los casos a) y b) anteriores.



Menisco formado en agua con colorante dentro de un tubo de diámetro pequeño. La concavidad es hacia arriba.



Menisco formado en mercurio dentro de un tubo. La concavidad es hacia abajo.



Actividad

Agentes surfactantes. La tensión superficial en el agua puede ser abatida por sustancias como las soluciones jabonosas. Por este hecho, los jabones son conocidos como agentes surfactantes. Para observar el efecto surfactante necesitas un vaso con agua, un poco de pimienta y una solución jabonosa. Esparce un poco de pimienta sobre la superficie del agua. Ahora deja caer una gota de la solución jabonosa en el centro de la superficie del agua y observa. La pimienta comienza a moverse hacia las orillas del vaso. ¿Cuál es la explicación de este hecho?⁵

⁵ El movimiento de la pimienta es debido a la disminución de la tensión superficial del agua con jabón. Antes de añadirse el jabón, la superficie del agua se comporta como una película o membrana tensa. Añadir el jabón, es semejante a debilitar el centro de la membrana con lo que se produce un “agujero” que se expande y arrastra consigo a la pimienta.

Ejemplo

- Has notado que las gotas de rocío sobre las telarañas son casi esféricas ¿A qué se debe esto?

Solución:

En principio, las gotas de rocío son muy pequeñas, de modo que la gravedad sobre ellas no es lo suficientemente fuerte para deformarlas; así, la tensión superficial prevalece sobre la gravedad, dándoles la forma esférica. La pequeña deformación resulta de la fuerza de adhesión con la fibra de la telaraña que la soporta.

Ejemplo

- El zancudo de agua puede sostenerse sobre el agua al igual que algunas arañas, sin hundirse y después salir de ella. Si has observado a una mosca que cae al agua notarás que no se hunde, pero tampoco puede salir de ella. ¿Qué ocurre en el caso de la mosca que no puede salir del agua?

Solución:

Tanto el zancudo de agua, como algunas arañas y la mosca no se hunden por estar sostenidas por la tensión superficial, ya que la superficie del líquido se comporta como una película “plástica”; pero esto es sólo la mitad del fenómeno. Recordemos la adhesión. Para el zancudo de agua y algunas arañas la adhesión con el agua no es lo suficiente grande como para no dejarlos escapar; en cambio, con la mosca la adhesión es lo bastante fuerte como para no dejarla escapar, “humedeciéndola”. Al hacerlo así, la cantidad de agua sobre ella (peso) no le permite levantar el vuelo. Esta cuestión se observa aun si la mosca se saca del agua y ni así logra volar.



Problemas propuestos

- Las fuerzas de _____ son fuerzas de atracción entre partículas semejantes.
- Las fuerzas de _____ son fuerzas de atracción entre partículas de diferentes sustancias que están en contacto.
- A pesar de que una delgada navaja de afeitar es de mayor densidad que el agua, puede flotar si se coloca en su superficie. ¿Qué la sostiene sin hundirse?
 - La flotación del agua por el volumen desalojado.
 - La tensión superficial y su mayor área de contacto al ponerla “acostada”.

37. Sobre una superficie plana y lisa se colocan tres gotas, de mercurio, agua y alcohol etílico, respectivamente. Se observa que la gota de mercurio es casi una esfera perfecta, la de agua es una esfera aplanada y la de alcohol prácticamente se desparrama. Considerando primero las fuerzas de cohesión y después las de adhesión con la superficie, ¿cuál de las secuencias en orden ascendente explican el fenómeno?

a) Alcohol > Agua > Mercurio

b) Mercurio > Agua > Alcohol



Problemas complementarios

14. Un radiador de automóvil tiene un pequeño orificio por el cual el agua no se fuga cuando está frío, pero al calentarse el agua comienza a salir. De acuerdo con esto, ¿cómo se afecta la tensión superficial por la temperatura?

15. Los jabones y detergentes son agentes tensoactivos, ya que modifican la tensión superficial al ser agregados al agua para la limpieza, permitiendo la incorporación de la suciedad al agua. ¿Cómo aumentarías su efecto en la limpieza?

El buzo cartesiano. El buzo flota porque su densidad promedio —obtenida de la masa de la ampollita y la masa del aire divididas entre el volumen que ocupan— es menor que la densidad del agua. Cuando se aprieta la botella, se aumenta la presión dentro de ella; y como el agua es incompresible, su densidad no cambia con la presión. Sin embargo, la burbuja dentro de la ampollita se comprime y el espacio que ocupa se reduce, con el consecuente aumento en la densidad promedio del buzo, hasta que se hunde. Para mantener al buzo suspendido dentro del agua, debe ajustarse la presión en la botella, de manera que la densidad promedio del buzo se iguale a la densidad del agua; esto es imposible si no se observa el buzo, ya que variaciones pequeñas en la presión causan aumento o disminución en la compresión de la burbuja, con lo que el buzo se hundirá o tenderá a flotar más.

1.2 Hidrodinámica



Actividad previa

Para regar un jardín. Para el cuidado de un jardín se necesita regarlo con regularidad, lo cual puede realizarse de manera eficiente utilizando una manguera. Pero,

te has preguntado ¿dónde se encuentra el agua cuando la llave del agua (el grifo) está cerrada y por qué comienza a fluir por la manguera cuando la abres? ¿Qué es lo que determina la rapidez con la que el agua fluye a través de la manguera? Si en una tubería en vez de agua fluyera aceite viscoso o grueso (o miel), ¿cómo se afectaría el flujo en comparación con el agua? ¿Por qué la boquilla hace que el agua llegue más lejos o más cerca al abrirla o al cerrarla? Para obtener información sobre el flujo de un líquido, realiza los siguientes experimentos.

Abre el grifo poco a poco y observa cómo empieza a fluir el agua. ¿Qué es lo que empuja al agua para que salga del grifo? ¿Qué le sucede a la rapidez con la que sale el agua, a medida que vas abriendo el grifo? Coloca una manguera en el grifo, de manera que la manguera no tenga boquilla regulable en el otro extremo. Al abrir el grifo, ¿fluye el agua tan rápidamente por el extremo de la manguera que como lo hacía al salir del grifo sin la manguera? Cubre el extremo libre de la manguera con el dedo pulgar casi por completo y observa cómo cambia el chorro que sale de la manguera. ¿Por qué el agua llega más lejos que si no taparas la salida del agua? ¿Sientes la presión del agua contra tu dedo? Coloca una boquilla regulable al extremo libre de la manguera y déjala abierta como a la mitad. Llena una cubeta con la manguera en estas condiciones. Quita la boquilla y llena la misma cubeta u otra semejante. ¿De qué manera la cubeta se llena más rápido?

IMPORTANTE: Toda el agua que utilices para los experimentos anteriores no debe desperdiciarse. Aprovechala para regar un jardín, y con el agua de las cubetas riega flores y plantas, o útilazala para limpieza.

1.2.1 Viscosidad



Preguntas previas

¿Qué es la fricción? ¿Cuáles son sus características (respecto de la rapidez dentro de un tubo y el tipo de sustancia)?

La manera en que funcionan las mangueras es relativamente simple. Por lo general, el agua que llega a las casas viene presurizada desde los sitios donde se surte. El agua se encuentra “esperando” dentro de las tuberías y, al abrir el grifo, le proporcionamos un orificio por donde fluye hacia una región en la que la presión es menor: el exterior de la tubería. Cuanto más se abre el grifo, el orificio se hace mayor, de manera que fluye una mayor cantidad de agua a través de él. Entonces, ¿de qué manera el tamaño del orificio afecta el flujo del agua?



Cuando el agua —o cualquier otro fluido— fluye a través del grifo, su movimiento se restringe por una clase de fuerzas denominadas *fuerzas viscosas*, las cuales aparecen siempre que, al fluir, una “lámina” de fluido se desliza sobre otra. Las fuerzas viscosas

son semejantes a la fuerza de fricción, en el sentido de que se oponen al movimiento entre las “láminas” de fluido y son fácilmente observables, por ejemplo, en la miel.

Si vaciamos un recipiente que contenga miel, observaremos que la miel que se encuentra en contacto directo con las paredes del recipiente prácticamente no se mueve. Las “láminas” de miel por encima de estas “láminas” pegadas a las paredes se mueven, pero con dificultad, ya que están sujetas por las fuerzas viscosas al tratar de moverse respecto de otras “láminas” de miel. Como la miel es un fluido “grosso” o, técnicamente, un *fluido viscoso*, las fuerzas viscosas tienden a hacer que toda la miel se mueva con la misma rapidez. Así, como la miel pegada a las paredes del recipiente no se mueve, las fuerzas viscosas intentan detener el movimiento de la miel restante.

La medida de la resistencia al fluir se denomina *viscosidad*. Es evidente que la viscosidad del agua es menor que la viscosidad de la miel y, si le aumentamos la temperatura, su viscosidad disminuye aun más. En general, para los líquidos, la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura. El origen de las fuerzas viscosas está en la cohesión molecular, por lo que al aumentar la temperatura la agitación térmica aumenta disminuyendo la cohesión. De esta forma, las moléculas pueden moverse con mayor facilidad. Las unidades del SI para la viscosidad son el pascal-segundo, cuyo símbolo es $Pa \cdot s$. En la tabla 1.3 se resumen algunos valores de viscosidad.

Tabla 1.3 Viscosidades aproximadas para algunos fluidos.

Fluido	Viscosidad $Pa \cdot s$
Helio (a 2 K)	0
Aire (a 20 °C)	0.0000183
Agua (a 20 °C)	0.00100
Aceite de oliva (a 20 °C)	0.084
Champú (a 20 °C)	100
Miel (a 20 °C)	1 000
Vidrio (a 20 °C)	10^{12}

Comentario. Los motores de los automóviles se protegen contra el desgaste gracias al uso de un agente lubricante, un aceite, de viscosidad controlada. Si el aceite fuera muy “delgado” fluiría entre las paredes en contacto de las partes del motor en que se usa, por lo que habría una gran fricción entre ellas. Si el aceite fuera demasiado “grosso”, el motor tendría que realizar un trabajo extra para mover las partes en contra de las fuerzas viscosas, con lo cual se gastaría más gasolina.

Los aceites modernos del tipo “multigrado” tienen una viscosidad constante dentro de un amplio intervalo de valores de temperatura. Este aceite contiene cadenas moleculares finas que se contraen para formar agregados globulares (como pelotitas) en los valores de temperatura bajos, y se “desenrollan” cuando aumenta la temperatura.

1.2.2 La ecuación de Bernoulli

El movimiento de fluidos es uno de los fenómenos más complejos de la naturaleza. Basta observar cómo se mueve, por ejemplo, el humo de un cigarrillo en el aire, o cómo se mueve un huracán. Para nuestros propósitos, haremos una suposición plausible que funciona muy bien en determinadas circunstancias. La idea es considerar que la viscosidad del fluido en movimiento es pequeña —en nuestro caso, trataremos generalmente con agua y aire—, y que el fluido se mueve como si estuviera formado por láminas que se deslizan unas sobre otras, sin *turbulencias*. Un flujo de estas características se denomina *flujo laminar* y es la primera aproximación al flujo de fluidos reales; por ejemplo, agua que fluye lentamente dentro de una tubería.



Preguntas previas

¿En qué consiste la incompresibilidad del agua? ¿Qué dice el principio de conservación de la energía mecánica? ¿Qué es la energía cinética? ¿Qué es la energía potencial gravitacional? ¿Qué se entiende por trabajo? ¿Qué establecen los teoremas del trabajo y la energía? ¿Cuál es la definición matemática de la presión?



Actividad

Una pelota de ping pong (tenis de mesa) es atraída por un chorro de agua.
Se necesita una pelota de ping pong sujeta, por ejemplo, usando un pegamento, a un cordel ligero. La pelota se suspende cerca (unos dos centímetros) de un grifo. Se abre la llave. ¿Qué sucede? ¿Por qué la pelota se mueve hacia el chorro de agua como péndulo? Después de estudiar la ecuación de Bernoulli, estaremos en condiciones de contestar tales preguntas.



Consideremos una tubería a través de la cual se mueve, por ejemplo, agua en condiciones de flujo laminar. Considera que las moléculas de agua describen trayectorias rectilíneas y que podemos representar el flujo mediante líneas denominadas líneas de corriente (figura 1.8). La tubería es tal que en algunas secciones su diámetro cambia y, además, presenta elevaciones como se indica en la figura 1.9. Puesto que el agua es incompresible, ¿cómo es posible hacer que fluya a través de tuberías de diferentes diámetros? La respuesta a esta pregunta es que, para que el flujo se mantenga sin problemas, la rapidez con la que fluye el agua debe cambiar en las diferentes secciones, de acuerdo con el diámetro de la tubería: donde el diámetro aumenta, la rapidez debe disminuir, y viceversa.

Pero eso no es todo. Ya que hay elevaciones, y variaciones de rapidez, todo el movimiento debe regirse por el principio de conservación de la energía aplicado entre dos puntos de la tubería. Esto es, el agua, como un todo, tiene energía cinética por su movimiento. Si la tubería se eleva y baja, la energía potencial gravitacional del agua cambiará de acuerdo con esos cambios de altura, y si llega a regiones donde la presión es mayor, debe realizarse trabajo para impulsarla y que continúe fluyendo.

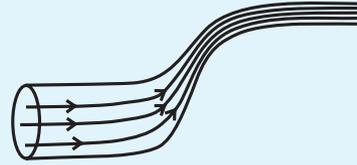


Figura 1.8 Líneas de corriente en un flujo.

En la figura 1.9 se muestra una porción del fluido (la región sombreada) y algunas de líneas de corriente. Al cabo de cierto tiempo (algunos segundos) el fluido se movió de la primera región, cuya área de sección es A_1 , hasta la región, también sombreada, hacia arriba y hacia la derecha donde el diámetro del conducto es A_2 .

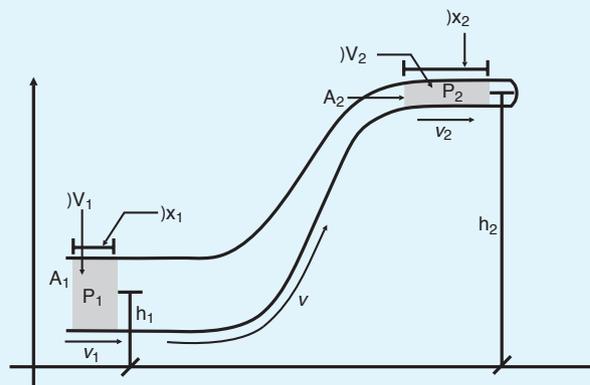


Figura 1.9 Presiones y rapidez en un flujo a través de una tubería de radio variable.

Como el agua es incompresible, el volumen que estamos considerando permanece constante, sólo cambia su longitud, debido al cambio en el área de sección recta. Entonces, tenemos las relaciones:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V \Rightarrow A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2$$

Al pasar de una región a otra, la energía cinética cambia de acuerdo con la discusión anterior sobre el cambio en la rapidez de flujo y, por el cambio de altura, cambia su energía potencial gravitacional, lo cual lo escribimos como:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \text{ y } \Delta E_p = m g h_2 - m g h_1$$

donde m es la masa del volumen de agua considerado. La densidad de este volumen de agua la expresamos simplemente, como $\rho = \frac{m}{\Delta V}$.

Para mantener el flujo en esas condiciones, es necesario empujar el agua de izquierda a derecha (en la figura 1.9), por ejemplo, mediante una bomba que ejerce una presión P_1 ; así, la porción de agua considerada aplica una presión P_2 a su derecha. El trabajo realizado sobre la porción de agua por la bomba es:

$W_1 = F_d = P_1 A_1 \Delta x_1$; mientras que el trabajo realizado por esta porción de agua contra el agua a su derecha es $W_2 = P_2 A_2 \Delta x_2$. Como el volumen de la porción es $\Delta V = A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2$, el trabajo total realizado en el proceso es:

$$W = W_1 - W_2 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V$$

o, en términos de la densidad:

$$W = P_1 \frac{m}{\rho} - P_2 \frac{m}{\rho}$$

Del principio de conservación de la energía y los teoremas del trabajo y la energía, el trabajo total debe ser igual a la suma de los cambios de energía cinética y de energía potencial gravitacional:

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

de donde, por manipulación algebraica, llegamos a la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1.7)$$

La ecuación recibe el nombre del científico y matemático suizo Daniel Bernoulli (1700-1782), quien la derivó por primera vez. Si examinamos con cuidado esta ecuación vemos que, cuando el fluido está estático, obtenemos la relación de la presión hidrostática:

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2$$

donde, si P_2 es la presión en la superficie del líquido, y $(h_2 - h_1)$ es la profundidad medida desde la superficie, h , deducimos la fórmula previamente utilizada:

$$P = P_0 + \rho g h$$

Uno de los fenómenos que podemos predecir y explicar a partir de la ecuación de Bernoulli es lo que ocurre cuando se tiene un fluido moviéndose con cierta rapidez. Supongamos que el fluido se mueve de manera que no hay cambios apreciables en la altura del flujo, de manera que puedan despreciarse los términos de energía potencial gravitacional en la ecuación (1.7). Obtenemos, entonces:

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

con lo que corroboramos lo afirmado anteriormente, respecto de que si la rapidez de flujo aumenta entre el punto 1 y el punto 2, entonces, la presión debe disminuir para que se mantenga la igualdad anterior. En otras palabras, un fluido que fluye con cierta rapidez genera una región de baja presión. Esto nos explica inmediata-

mente por qué la pelota de ping pong se acerca al chorro del agua en el grifo: la pelota se acerca al chorro de agua porque en la parte de la pelota opuesta a chorro actúa la presión atmosférica completa, que la empuja hacia la región donde la presión ha disminuido a causa del flujo del agua.

Ejemplo

- Un fenómeno natural que mueve el aire de la atmósfera con gran rapidez es un huracán, cuyos vientos llegan a alcanzar rapidez de $150 \frac{km}{h}$ o más. Supón que por arriba del techo de una casa sopla un viento de $28.0 \frac{m}{s}$ (categoría 1), cuya densidad es de $1.28 \frac{kg}{m^3}$. ¿Qué reducción de presión respecto de la atmosférica se produce entre el exterior y el interior de la casa? ¿Qué fuerza se ejerce sobre el techo si fuera de dimensiones de 4.0m x 4.0 m y en qué dirección?

Solución:

La mayor rapidez del aire en el exterior, v_1 , origina una disminución de la presión fuera de la casa; sean P_1 esta presión y P_2 la presión en el interior de la casa, igual a la atmosférica y, también, considerando el aire sin movimiento, $v_2 = 0$. La diferencia de alturas entre las caras del techo es despreciable, $h_1 = h_2$ y además, siendo aire, su presión hidrostática sería también despreciable. Eliminando términos de la ecuación de Bernoulli tenemos: $P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2$. Entonces, la disminución de la presión respecto de la atmosférica será: $P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{1}{2}(1.28)(28.0)^2$ Pa. De la definición de presión despejamos la fuerza: $F = PA = (502)(4.0) = 8.0 \times 10^3$ N; como es mayor la presión interior de la casa, la fuerza es de adentro hacia fuera, es decir, lo trata de levantar, lo cual se observa en la estructura de los techos de las casas por donde azotan los huracanes. Imagina que ocurre para una rapidez de vientos de huracán categoría cuatro.

Ejemplo

- El término médico aneurisma se aplica a la dilatación anormal de un vaso sanguíneo. Suponer que en la aorta, debido a un aneurisma, aumenta su sección transversal en un 70 % de la normal, si la rapidez de la sangre en condición normal en la aorta es $0.39 \frac{m}{s}$ y en este aneurisma disminuye a $0.23 \frac{m}{s}$. Determina el exceso de

presión en la región dilatada cuando la aorta está en posición horizontal respecto de ella. $\rho_{san} = 1060 \frac{kg}{m^3}$.

Solución:

La presión en la región dilatada P_2 es mayor, ya que la sangre se mueve más lentamente al aumentar la sección transversal. Si v_2 es la rapidez de la sangre en este sitio, P_1 y v_1 son la presión y rapidez antes del aneurisma. En posición horizontal (acostado) la alturas $h_1 = h_2$ y no hay presión hidrostática excedente. Simplificamos términos en la relación de Bernoulli y resolvemos para el aumento de presión como $\Delta P = P_2 - P_1$ para obtener:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho_{san} v_1^2 - \frac{1}{2} \rho_{san} v_2^2 = \frac{1}{2} \rho_{san} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} (1060) [(0.39)^2 - (0.23)^2] = 53 \text{ Pa.}$$

Este exceso de presión debilita aún más las paredes dilatadas de la arteria y podría abrir su pared causando una hemorragia masiva.



Problemas propuestos

38. Un conductor maneja su automóvil a $100 \frac{km}{h}$. Por el carril opuesto viene hacia él un trailer de 22 ruedas con la misma rapidez. ¿Qué es lo que ocurre al pasar uno al lado del otro?

- El automóvil es impulsado hacia fuera del carril donde circula.
- El automóvil es impulsado hacia el carril contrario donde circula.
- No hay efecto alguno en el movimiento del automóvil.

39. Comúnmente circulamos en las carreteras con los vidrios cerrados. Si alguien fuma adentro, en la parte posterior, ¿qué efecto tendrá el hecho de abrir un poco alguna de las ventanillas?

40. A lo largo de una tubería horizontal con área de sección transversal 0.0695 m^2 , fluye un gas de densidad $1.35 \frac{kg}{m^3}$ con una rapidez de $19.6 \frac{m}{s}$. Para que entre a un tanque de almacenamiento, se hace pasar por una reducción a una sección transversal de 0.0510 m^2 . Si la diferencia de presiones en la reducción es de 125.0 Pa , ¿cuál es la rapidez del gas después de la reducción?

Solución:

41. Por una manguera horizontal de 4.50 cm de diámetro fluye agua con una rapidez de $0.510 \frac{m}{s}$ y sale por una boquilla de 0.650 cm de diámetro. ¿Cuál debe ser la presión absoluta del agua en la manguera, si la presión en la boquilla de salida es la atmosférica?

Solución:

1.2.3 El movimiento es relativo



Preguntas previas

¿Cómo se define el movimiento? ¿Qué es un sistema de referencia?

Como la descripción del movimiento de un objeto depende del sistema de referencia (SR), respecto del cual se realizan las mediciones de posición, rapidez y aceleración, decimos que el movimiento es relativo. Lo que significa esta afirmación es que el movimiento se describe respecto de un SR dado. Entonces, pensemos en la siguiente situación. Si vamos en un autobús, nuestro movimiento podría interpretarse de dos formas: como que el autobús se mueve

respecto del piso o como que el piso se mueve respecto del autobús. En el primer caso, el SR se sitúa en el piso; y en el segundo caso el SR se sitúa en el autobús. Las mediciones que se hagan de rapidez y posición en uno u otro casos, ¿serán iguales o diferentes?

Los túneles de viento que se utilizan en la industria automotriz consisten en una cámara (el túnel), donde se coloca un automóvil en reposo y se hacen funcionar ventiladores muy poderosos, los cuales generan flujos laminares del aire dentro del túnel. Si se suelta, por ejemplo, humo dentro del túnel en funcionamiento, el humo se moverá arrastrado por el aire en forma de una línea de corriente y, entonces, al encontrarse con el automóvil, podrá verse la curvatura de la línea de corriente del humo que rodea la carrocería.

El túnel de viento simula las condiciones del aire cuando el automóvil se encuentra en movimiento respecto del piso y es posible realizar mediciones para mejorar o probar nuevos diseños aerodinámicos de las carrocerías. Esto es posible porque las mediciones son las mismas, ya sea que el SR se sitúe en el automóvil o en el piso.

En general, para un avión en pleno vuelo, se habla de la velocidad del viento para conocer la rapidez con la que el avión se mueve respecto de tierra. En ese caso, el SR de referencia se sitúa en el avión y los resultados son completamente satisfactorios.

1.2.4 Las alas de los aviones



Preguntas previas

¿Por qué vuela un avión? La densidad de un avión es mucho mayor que la del aire, por lo que no ocurre lo mismo que con la flotación de buques; entonces, si no es aplicable el principio de Arquímedes, ¿qué es lo que hace que un avión se sostenga en el aire?



Una importantísima aplicación de la ecuación de Bernoulli la encontramos en el diseño de las alas de un avión. De acuerdo con la discusión de la sección precedente, situaremos el SR en las alas de un avión, tal como si éstas se encontraran en un túnel de viento. El ala de un avión tiene un perfil cuya forma es como se observa en la figura 1.10a. Las líneas de corriente, como se observarían en el túnel de viento con algo de humo, tomarían la forma que se muestra en la figura 1.10b. Podemos apreciar que en la parte superior del ala, las líneas se curvan y se comprimen, lo que indica que su rapidez aumenta. El efecto es análogo a lo que ocurre en la tubería que cambia de diámetro discutido con anterioridad.

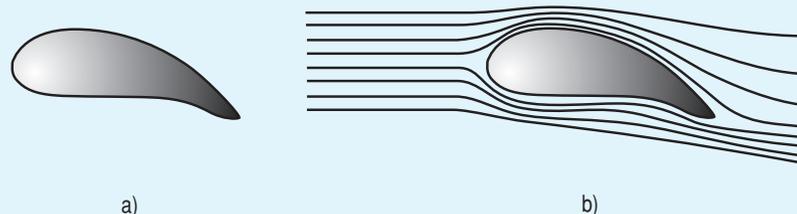


Figura 1.10 a) Perfil de ala, b) líneas de corriente alrededor del ala.

Por su parte, el flujo por la parte inferior del ala permanece prácticamente inalterado. El aumento de rapidez en la parte superior del ala acarrea una disminución en la presión, de acuerdo con Bernoulli, de manera que entre las dos superficies del ala, superior e inferior, se establece una diferencia de presiones, que es análoga a la diferencia de presiones en la pelota de ping pong: por la parte inferior del ala es mayor que por la parte superior, por lo que la presión inferior mayor empuja el ala hacia arriba generando lo que se denomina sustentación. Si la fuerza de *sustentación* supera la fuerza gravitacional sobre el avión, éste asciende. Claro que para que haya sustentación el avión debe moverse con una rapidez mínima, por debajo de la cual la sustentación es menor que la fuerza gravitacional con las consecuencias por todos conocidas. Así, para que un avión se eleve, debe recorrer la pista de despegue con aceleración constante, hasta alcanzar la rapidez con la que comienza el efecto de sustentación y pueda elevarse.

Por otro lado, las alas y la cola de un avión cuentan con una serie de partes móviles (los alerones, los *flaps*, etcétera) cuya función es cambiar la forma del ala de forma tal que se maximicen o minimicen los efectos aerodinámicos sobre ellas. Al despegar, al aterrizar, al dar la vuelta y al estar en pleno vuelo, el piloto maniobra con cada uno de estos elementos.



Actividad

Investiga en alguna fuente confiable, cómo están construidas las alas de los aviones en términos de alerones, flaps, etcétera y explica el funcionamiento de cada parte. Hay un elemento en la parte superior de las alas que se usa para ayudar a que el avión frene durante el aterrizaje. ¿Cómo funciona este elemento?



Pregunta

Los automóviles de carreras tienen en su carrocería elementos estructurales que les proporcionan estabilidad y los ayudan a alcanzar mayores rapidezces; el spoiler es uno de ellos. Si observamos con cuidado una fotografía de un automóvil de Fórmula 1, apreciamos que el spoiler tiene forma de ala, pero está colocado al revés que el ala de un avión; podemos decir que el spoiler es una ala invertida. ¿Cuál será la razón por la que se colocan spoilers a estos automóviles?⁶

⁶ Ya el *spoiler* es un ala invertida, su función es opuesta a la del ala. La presión mayor se encuentra en la parte superior, por lo que el empuje es hacia abajo. De manera que se emplean para darle a los automóviles mayor “agarre” a la pista, aumentando su estabilidad.



Problemas complementarios

16. El ala de un avión se diseña de tal forma que la rapidez del aire que fluye por la zona superior del ala sea de $250 \frac{m}{s}$ y por debajo de ella sea de $220 \frac{m}{s}$. Si la densidad del aire es de $1.28 \frac{kg}{m^3}$, ¿cuál será la fuerza de empuje ascendente sobre el área del ala igual a 21.0 m^2 ?

Solución:

17. En muchos de los automóviles de colección y de la clase Hot Rod, el sistema de inyección de combustible funciona usando un carburador. En un automóvil típico, el aire de admisión de un carburador entra por un ducto de 1.50 cm de diámetro y con rapidez de $0.79 \frac{m}{s}$, para después pasar por una restricción (venturi) que reduce el diámetro hasta un mínimo de 0.31 cm. ¿Cuál es la máxima rapidez de la mezcla aire y combustible al salir de la garganta del carburador? No considere el combustible incorporado en el proceso.

Solución:

1.2.5 Gasto y ecuación de continuidad



Preguntas previas

¿Cómo se define la rapidez según Galileo? ¿Qué significan físicamente sus unidades?



Consideremos nuevamente el caso del fluido que circula a través de una tubería de área variable, como en la figura 1.9, y la condición $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$. Si ahora introducimos el lapso en el que ΔV se mueve, tendremos el cociente $\frac{\Delta V}{t}$. Analicemos su significado a través de las unidades, metros cúbicos por segundo en el sistema internacional de unidades. El cociente significa *cuántos metros cúbicos pasan por una superficie transversal determinada en cada segundo*. Esto es, sus unidades son análogas a las unidades de la rapidez galileana, por lo que podemos afirmar que el cociente anterior representa una *rapidez* que, al tratarse de un fluido en movimiento, la identificamos como una *rapidez de flujo*; a ésta también se le conoce como el *gasto* o, a veces, como *flujo volumétrico*. Para nuestros propósitos, nos referiremos a tal cociente como *gasto* o *rapidez de flujo*, indistintamente y utilizaremos la letra Q para representarlo.

De las mismas relaciones asociadas con la figura 1.9, observamos que:

$$\Delta V = A_1 \Delta x_1 \Rightarrow \frac{\Delta V}{t} = A_1 \frac{\Delta x_1}{t} = A_1 v_1$$

de donde llegamos a la importante ecuación, denominada ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

La importancia de esta ecuación reside en el hecho de que nos explica cómo se comporta un fluido incompresible al fluir por una tubería en la que se encuentran variaciones en los diámetros. Se puede observar que si al área aumenta de un punto a otro, disminuye la rapidez con la que fluye el líquido.

Ejemplo

- La sangre circula con una rapidez de $10 \frac{cm}{s}$ a través de una arteria, desde una región donde ésta tiene un radio de 0.3 cm, hacia otra región en la que las paredes arteriales se han engrosado debido a un proceso de arteriosclerosis. ¿Cuál es la rapidez de la sangre en la zona afectada de la arteria, si su radio se ha reducido a 0.2 cm? ¿Cuál es el gasto a través de la primera parte de la arteria? ¿Y a través de la parte afectada de la arteria?

Solución:

$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{\pi(0.3)^2}{\pi(0.2)^2} (10 \frac{cm}{s}) v_2 = 22.5 \frac{cm}{s}$. La rapidez ha aumentado por la reducción del radio de la "tubería" por donde fluye el líquido, en este caso la sangre. Para la segunda pregunta, tenemos:

$Q = A_1 v_1 = \pi(0.3)^2 (10 \frac{cm}{s}) = 9.42 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 5.65 \frac{L}{min}$. Por la ecuación de continuidad el gasto es el mismo en la porción afectada de la arteria.

Ejemplo

- El agua fluye por una manguera de jardín y llena un balde de 3.0 galones en 35.0 s. ¿Cuál es la rapidez con la que sale el agua de la manguera, si su diámetro es 0.750 pulgadas sin boquilla de salida? Si ahora a la salida de la manguera se le coloca una boquilla de restricción que reduce el diámetro a la mitad, ¿cuál será la rapidez de salida del agua? 1 galón = 231 pulgadas cúbicas.

Solución:

Calculamos el gasto a partir del volumen del balde y el tiempo requerido para

llenarlo: $Q = \frac{V}{T} = \frac{(3.0 \text{ gal})(231 \frac{\text{pul}^3}{\text{gal}})}{35.0 \text{ s}} = 20 \frac{\text{pul}^3}{\text{s}}$, igualando con $Q = Av$, despejamos la

v sin restricción: $v = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi \left[\frac{0.750}{2} \right]^2} = 45 \frac{\text{pul}}{\text{s}}$. Para cuando se coloca la restricción,

de acuerdo con la ecuación de continuidad, el gasto es el mismo pero aumenta la

rapidez del agua; entonces: $v_{\text{res}} = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi \left[\frac{0.750}{2(2)} \right]^2} = 1.8 \times 10^2 \frac{\text{pul}}{\text{s}}$.



Problemas propuestos

42. De un hidrante para incendios se conectan dos mangueras, cada una de 4.0 cm de diámetro. La tubería a través de la cual el agua llega al hidrante tiene un diámetro de 16.0 cm y se mueve a $3.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. ¿Cuántos kg de agua se pueden usar para combatir un incendio en tales condiciones? ¿Qué rapidez tiene el agua si se usan las dos mangueras al mismo tiempo? ¿Será la misma rapidez si solo se usa una manguera? Si no es así, ¿cuál será la rapidez?

Solución:

43. Por una tubería de 1.00 pies de radio, se conduce petróleo con una rapidez de 4.10 pies por segundo. ¿Cuántos pies cúbicos de petróleo fluyen por la tubería en un día? ¿A cuántos litros equivalen?

Solución:

44. La sangre, al circular por la aorta tiene aproximadamente una rapidez de $0.355 \frac{m}{s}$. Si su sección transversal es de $1.95 = 10^{-4} m^2$, a) ¿cuál es el gasto volumétrico a través de la aorta? b) La aorta al ramificarse a través de todo el cuerpo en los vasos capilares puede alcanzar a cubrir cerca de $0.27 m^2$ debido a su pequeña sección transversal. ¿Cuál es la rapidez promedio que tiene la sangre al circular por los capilares?

Solución:



Problemas complementarios

18. Un ducto rectangular de sección transversal, de 25.0 cm por 50.0 cm, conduce el aire acondicionado y fresco a una oficina de trabajo, cuyo volumen es $90.0 m^3$. ¿Cuál es la rapidez que debe tener el aire a través del ducto, si el aire dentro de la oficina debe de ser totalmente restituido con aire nuevo cada 5.5 min?

Solución:

19. Se bombea gasolina de densidad $0.850 \frac{gr}{cm^3}$ fuera de un depósito a través de un tubo de 2.85 cm de diámetro con rapidez de $3.50 \frac{m}{s}$. Este tubo se une a otro tubo cuyo diámetro es de 1.50 cm y donde, al medir la presión, da 160.0 kPa. ¿Cuál es la presión en el depósito de almacenamiento?

Solución:

Unidad 2

CALOR Y TEMPERATURA





Si le damos un empujón a un carrito que se encuentra originalmente en reposo y lo dejamos rodar libremente sobre el suelo, después de recorrer cierta distancia perderá toda su energía cinética y volverá a su estado de reposo. Ahora, si dejamos caer una pelota de esponja rebotará unas cuantas veces y también se detendrá. Incluso un péndulo, después de oscilar durante un tiempo, quedará en reposo. ¿Qué le sucede a la energía cinética de los objetos mencionados? ¿Es que acaso la ley de la conservación de la energía no se cumple realmente? Como tal ley es una ley de la naturaleza y los científicos saben que se cumple siempre al pie de la letra, concluimos que el enunciado que conocemos hasta ahora, $\Delta E = 0$ (ya sea considerando solamente la energía mecánica o incluyendo los términos que dieron origen a la ecuación de Bernoulli, vea la ecuación 1.7) tiene limitaciones, o que debemos descubrir otra forma de energía e inventar una definición adecuada para ella. De esta manera, al agregarla a la ecuación $\Delta E = 0$, será posible explicar qué sucede con la energía perdida y, con ello, el porqué de los eventos mencionados al inicio.

El hallazgo de esa forma de energía y su primera definición la dio James Joule (1818-1889) en el siglo XIX, como resultado de una serie de experimentos realizados con gran precisión. Joule demostró que la energía mecánica utilizada y aparentemente perdida para agitar agua (como lo hacemos para disolver azúcar), era proporcional a la elevación de la temperatura del agua, con lo cual Joule concluyó que, aparentemente, la energía mecánica había cambiado las propiedades internas del agua. Lo curioso es que hubiera obtenido los mismos resultados al calentar el agua en un horno o a la flama. En esta unidad estudiaremos los cambios que se llevan a cabo en los fluidos y en los sólidos cuando se les aumenta —o disminuye— su contenido energético.

2.1 Temperatura



Actividad

Un termómetro humano. Necesitarás tres contenedores, de tal tamaño que quepa tu mano completa y cómodamente en cada uno. Coloca en uno de los recipientes agua caliente, en otro agua fría y en otro agua a temperatura ambiente. Introduce la mano derecha en el recipiente con agua caliente y la mano izquierda en el del agua fría durante unos quince segundos. Luego saca las manos e introdúcelas juntas en el recipiente de agua a temperatura ambiente. ¿Qué sientes?



Preguntas previas

¿En qué consiste la incompresibilidad del agua? ¿Cómo se define la energía cinética? ¿Y la energía cinética interna? ¿En qué consiste la compresibilidad de los gases?

Como todos los objetos que hemos estudiado previamente, el aire tiene masa y peso, aunque, a diferencia de otros, no tiene forma ni volumen definidos. Supongamos que disponemos de un kilogramo de aire. A esta cantidad podemos darle la forma que deseemos y lograr con relativa facilidad que ocupe diferentes volúmenes; por ejemplo, al reducirlo a un tanque de buceo o al confinarlo en un salón de clases. Esto sucede porque el aire, como todos los gases, es compresible, lo cual significa que puede cambiarse el volumen que ocupa una cantidad dada.



Ahora, nuestra definición de *física* como el estudio de todos los aspectos mensurables de la naturaleza, nos lleva a preguntarnos sobre cómo medir el movimiento térmico de las partículas del aire. La forma de hacerlo es por medio de la *temperatura*. Definimos la temperatura como una *medida de qué tan caliente se encuentra un objeto*. Por supuesto que, para medir cualquier cosa, necesitamos una escala y unas unidades (vea el apéndice). De manera que para la temperatura tenemos, en el sistema internacional, dos escalas, la Celsius, y la Kelvin o escala absoluta. En la primera, las unidades son los grados Celsius, °C; mientras que en la escala Kelvin, son los kelvins, K. La temperatura expresada en kelvins también recibe el nombre de temperatura absoluta. En cuanto a tamaño, los grados Celsius, comparados con los kelvins, son iguales y están relacionados por la equivalencia $0\text{ °C} = 273\text{ K}$. Es decir, $100\text{ °C} = 373\text{ K}$. Esa escala nos permite darnos una idea de qué tan caliente está un objeto, ya que tenemos la idea intuitiva de que el agua a 0 °C se siente muy “fría”; en tanto que si estamos a 36 °C sabemos que es un día muy caluroso.

Una tercera escala de temperatura, utilizada en países de habla inglesa, es la escala Fahrenheit, donde la unidad es el grado Fahrenheit, °F. Estos grados tienen un “tamaño” diferente de los grados Celsius y se relacionan a través de las fórmulas:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$

Ejemplo

- ¿A cuántos grados Fahrenheit corresponden los siguientes valores de temperatura en grados Celsius?: a) 25 °C que corresponde a una temperatura ambiental agradable; b) 37 °C la temperatura del cuerpo humano; c) -20 °C viento helado.

Solución:

a) Sustituimos $T_f = \frac{9}{5}(25) + 32 = 77 \text{ }^\circ\text{F}$; b) $T_f = \frac{9}{5}(37) + 32 = 99 \text{ }^\circ\text{F}$; y por último

c) $T_f = \frac{9}{5}(-20) + 32 = -4 \text{ }^\circ\text{F}$.

Ejemplo

- ¿A cuántos grados Celsius corresponden los siguientes valores de temperatura en grados Fahrenheit? a) $122 \text{ }^\circ\text{F}$ de temperatura en un desierto a medio día; b) $203 \text{ }^\circ\text{F}$, la de un café caliente; y c) $-58 \text{ }^\circ\text{F}$, la temperatura más baja registrada en el Polo Norte.

Solución:

a) Sustituimos $T_c = \frac{5}{9}(122 - 32) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; para b) $T_c = \frac{5}{9}(203 - 32) = 95 \text{ }^\circ\text{C}$; y finalmente

c) $T_c = \frac{5}{9}(-58 - 32) = -50 \text{ }^\circ\text{C}$.



Problemas propuestos

1. Para las siguientes temperaturas en $^\circ\text{C}$ calcula su valor en $^\circ\text{F}$, y viceversa, según sea el caso: a) $4 \text{ }^\circ\text{C}$; b) $80 \text{ }^\circ\text{C}$; c) $-10 \text{ }^\circ\text{C}$; d) $-100 \text{ }^\circ\text{C}$; e) $0 \text{ }^\circ\text{F}$; f) $100 \text{ }^\circ\text{F}$; g) $-32 \text{ }^\circ\text{F}$; h) $-212 \text{ }^\circ\text{F}$.

Solución:

2. Hay una temperatura a la cual las escalas Celsius y Fahrenheit tienen el mismo valor y miden, por lo tanto, la misma temperatura. ¿Cuál es esta temperatura?

Solución:



Problemas complementarios

1. Para operar adecuadamente algunas computadoras soportan un intervalo de temperaturas de 10.0 °F a 110 °F. ¿Cuáles son estas temperaturas en grados Celsius?

Solución:

2. En un horno de microondas se calienta un alimento de 20 °C hasta 120 °C. ¿Cuál es el cambio de temperatura en grados Fahrenheit?

Solución:

2.2 Calor



Preguntas previas

¿Cómo se define la energía? ¿Cuáles son sus unidades? ¿Cómo se comportan las moléculas del aire?

En cuanto al *calor*, como concepto físico, hay dos maneras de entenderlo: la primera es la que empleamos todos los días para referirnos a estados del estado del clima o de las cosas; por ejemplo, usamos de manera informal expresiones como “hace mucho calor”, o su contraparte “hace mucho frío”, y todos entendemos lo que se quiere decir. Sin embargo, en el lenguaje técnico de la física la palabra calor se usa para designar un concepto muy preciso, que tiene que ver con un proceso. Calor se refiere a un proceso de transferencia de energía, por lo que la manera usual de definir el calor es como *energía en tránsito*. Esto significa que cuando nos referimos al calor, estamos haciendo referencia a cómo se transfiere la energía de un objeto a otro. De acuerdo con esto, el calor debe medirse en unidades de energía, joules; sin embargo, existe otra unidad de uso más frecuente para medir el calor, la *caloría*, que se representa con la letra “c” minúscula, cuya equivalencia es de 4.184 joules y su símbolo es *cal*.

Por su parte, la energía a la que nos referimos en el proceso la denominamos *energía térmica* o *energía calorífica*, y está relacionada muy estrechamente con la energía cinética interna. Así, cuando un objeto tiene una temperatura relativamente alta, su contenido de energía térmica es también relativamente alto, de manera que, si un objeto contiene mucha energía, entonces cada uno de sus componentes, átomos y moléculas, tiene un alto contenido de energía, por lo que sus movimientos son más rápidos.

Entonces, debemos tener en cuenta las siguientes consideraciones. Para una misma sustancia, por ejemplo agua, la diferencia entre agua sólida, agua líquida y agua gaseosa, es el grado de movilidad que tienen sus moléculas. En el agua sólida —como en todos los sólidos— sus moléculas se encuentran en posiciones relativamente fijas, es decir, fijas unas con respecto de otras; pero no se encuentran en reposo, sino que se encuentran *vibrando*. En el agua líquida —como en todos los líquidos— sus moléculas se encuentran en movimiento relativo, aunque todavía en contacto entre sí; mientras que, en el agua gaseosa o vapor —como en todos los gases—, las moléculas se mueven de manera más rápida y violenta, en todas direcciones, con un amplio intervalo de rapidez, de acuerdo con lo discutido en la sección 1.1.1. Aquí, el contacto entre ellas se da mediante colisiones.

2.3 Capacidad calorífica



Actividad

¿Has visto a los llamados faquires que son capaces de caminar descalzos sobre brasas ardientes? En general, se pensaría que como son faquires, su mente domina la materia y no se queman ni sienten dolor. ¿Existirá una explicación más satisfactoria en términos científicos a este hecho?

Cuando dos objetos a diferentes temperaturas se ponen en contacto, espontáneamente comienza un proceso de intercambio de energía, durante el cual ésta fluye del cuerpo que se encuentra a mayor temperatura al cuerpo que se encuentra a menor temperatura. Tal flujo de energía se prolonga hasta que los dos cuerpos alcanzan la misma temperatura. Aquí es muy importante aclarar que el cuerpo que está a mayor temperatura no contiene calor; lo que contiene es energía térmica. Al estado en que las temperaturas llegan a ser iguales se le llama *equilibrio térmico*, y decimos que los cuerpos *se encuentran* en equilibrio térmico.



Ahora, es una experiencia fácil de constatar que objetos de diferentes materiales no siempre parecen estar en equilibrio térmico, aun cuando se hayan puesto en contacto durante un lapso considerable. Por ejemplo, las bancas del salón de clases donde te encuentras tienen al menos dos componentes de diferente material. Es probable que la paleta sea de madera, mientras que tal vez la estructura sea metálica. Si tocas la paleta y tocas el metal, encontrarás que se sienten como si tuvieran temperaturas diferentes: la madera parece tener una temperatura mayor que el metal; es decir, el metal se siente más frío. Pero ambos materiales han estado en el salón durante lapsos iguales y podríamos afirmar que deberían estar en equilibrio térmico con el medio ambiente. ¿Por qué la experiencia muestra la sensación de diferentes temperaturas para ambos? La respuesta está en una propiedad de cada material denominada *capacidad calorífica* (también denominada capacidad calorífica específica o calor específico), la cual se define como *la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de material*. De aquí concluimos que la capacidad calorífica es única para cada material y nos describe una característica térmica de los materiales. Utilizaremos la letra c como símbolo para denotarla. De acuerdo con su definición, las unidades de c son $\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$.

De esta manera podemos inferir que la capacidad calorífica está relacionada con la rapidez con la que se absorbe o se emite energía térmica. ¿Qué tipo de material absorberá (o emitirá) más rápidamente energía térmica, uno con c pequeña o uno con c grande? En efecto, el que tiene el menor valor de capacidad calorífica, de acuerdo con su definición. Y ahora estamos en posición de contestar la pregunta sobre las bancas. Sentimos más frío el metal porque su capacidad calorífica es menor y, entonces, absorbe energía de nuestra mano más rápidamente que la madera y por eso lo sentimos más frío.

Una situación de interés particular está dada al considerar lo que hemos notado de nuestra experiencia en la playa. Es claro que la energía proveniente del sol es la misma en cantidad tanto para el agua del mar como para la arena; pero, ¿cuál de los dos, mar o arena, está a mayor temperatura? Nuestros adoloridos pies afirmarían que es la arena de la playa; mientras que el agua está a menor temperatura. Por consiguiente, deducimos que el agua tiene una mayor capacidad calorífica que la arena, ya que para la misma cantidad de energía proporcionada se elevó menos su temperatura que la arena.

Respuesta a la pregunta sobre los faquires. Las brasas son de madera, la cual tiene una capacidad calorífica bastante grande. Esa razón las convierte en muy malas conductoras del calor. Aun cuando las brasas se encuentren ardientes (al rojo vivo) su baja conductividad permite dar pasos rápidos sin que se transfiera mucha energía; recordemos que la temperatura alta y qué tanta energía se transfiere son conceptos muy diferentes. Algo que también ayuda es que los pies se encuentran húmedos por sudoración o porque previamente se ha pisado una superficie húmeda (muy común en estos casos); la mayor cantidad de energía térmica se va en evaporar esta agua, de manera que el vapor proporciona una capa aislante.



Problemas propuestos

3. Si se suministra la misma cantidad de calor a dos materiales distintos pero de la misma masa, ¿por qué no tienen el mismo aumento de temperatura?

4. La arena de los desiertos tiene una temperatura muy alta durante el día y muy baja durante la noche. ¿Cómo es su capacidad calorífica?

5. El cuerpo humano está constituido por tres cuartas partes de agua; este hecho, ¿nos beneficia o nos perjudica para mantener la temperatura estable tanto en clima frío como en clima caliente, si el agua es la sustancia de mayor capacidad calorífica de nuestro entorno? ¿Por qué?

6. Si dos objetos se ponen en contacto y se observa que no hay cambio en la temperatura de los dos, entonces, tienen temperaturas _____.
7. La energía que se transfiere espontáneamente de un cuerpo con mayor temperatura a otro de menor temperatura es energía _____ y es una forma de energía en tránsito.
8. La capacidad calorífica de un material es la medida de la relación entre el calor suministrado y su:
 - a) Temperatura
 - b) Cambio de temperatura
 - c) Temperatura de equilibrio térmico

2.4 Procesos de transferencia de calor

Hay tres maneras en que el proceso de transferencia de energía térmica se lleva a cabo: por convección, por conducción y por radiación.

2.4.1 Convección



Actividad

Organízate con tus compañeros para formar equipos y discutan la causa de la siguiente situación, que ocurre todos los días. Al final de esta sección retomar las causas probables que propusieron y reconsideren, si es necesario, cambiar sus afirmaciones

En las playas, cuando el sol calienta la arena, se siente la brisa marina que fluye del mar hacia la playa. ¿Cuál es el origen o la causa de esta brisa marina? En muchas otras ocasiones, por las noches, cuando la arena de la playa está fría, es posible sentir brisa marina de la playa hacia el mar. ¿Por qué se invierte el sentido de la brisa?

El proceso de convección se lleva a cabo en fluidos y podemos observarlo tomando como ejemplo el agua. Cuando ponemos un poco de agua en un recipiente transparente y lo ponemos al fuego, por ejemplo, sobre la parrilla de una estufa.



Después de cierto tiempo, relativamente corto si no es mucha agua, se observa que se forman unas “onditas” desde el fondo, de donde está dando la flama hacia arriba. Estas onditas forman lo que se denomina una *corriente de convección*. La corriente de convección tiene su origen en el siguiente proceso.

Las moléculas de agua en contacto con el fondo y las más próximas a la superficie inferior del recipiente adquieren rápidamente energía, por lo que su movimiento se incrementa y comienzan a empujarse entre sí. Con esto, se forman regiones internas en las cuales la densidad es menor que en el resto del líquido, por lo que estas porciones de agua de menor densidad tienden a flotar, y comienzan un movimiento ascendente. Sin embargo, a las demás moléculas que no tienen la misma cantidad de energía se les dificulta el ascenso y son, a la vez, empujadas hacia abajo para ocupar el lugar de las moléculas que ascienden. De esta manera se dan las corrientes de convección: las moléculas más calientes suben y hacen que las moléculas menos calientes bajen, hasta que la energía se distribuye por toda el agua. Éste es el proceso de transferencia de calor por convección. Cabe notarse que la convección implica transporte de materia de un lugar a otro en la sustancia. En todos los fluidos la convección se lleva a cabo de manera semejante.

Pregunta

Las lámparas de escritorio, por lo general, tienen perforaciones en la parte superior, donde se encuentra la conexión del foco. ¿Cuál es la función de estas perforaciones?¹

2.4.2 Conducción



Actividad

Organicen equipos de trabajo y discutan la causa de la siguiente situación: Tomen una varilla metálica no muy larga ni muy gruesa por uno de sus extremos. Coloquen el otro extremo en la flama de un mechero encendido (o cualquier otro artefacto que dé una flama). Notarán que al cabo de un tiempo no es posible sostener la varilla. ¿Cómo fue que aumentó la temperatura en el extremo alejado de la flama? Ahora introduzcan la varilla en un vaso con hielos. Pronto sentirán que el extremo por el que la sostienen se enfría. ¿Es que el frío fluye por la varilla? Al final de esta sección retomen las probables causas que propusieron y reconsideren si es necesario cambiar sus afirmaciones.



La conducción es un proceso que se lleva a cabo en sólidos. Cuando a un sólido se le proporciona calor por algún extremo, por ejemplo, pensemos en una barra de metal que se sostiene por un extremo, y por el otro se acerca a una flama. En poco tiempo, el extremo por el que se sostiene la barra se siente caliente. Lo que sucedió es que, en el extremo libre que se acercó a la flama, los átomos del metal comienzan a adquirir energía, por lo que sus movimientos de vibración se hacen más rápidos y violentos, aumentando la amplitud de vibración. Este fenómeno hace que, vecinos literalmente, los átomos con mayor energía empujen a sus átomos contiguos chocando contra ellos. Estas colisiones producen un intercambio tanto de ímpetu como de energía y, así, los átomos más próximos a la flama transfieren energía a los siguientes, éstos a los que les siguen y así sucesivamente: la energía se va transfiriendo por interacciones desde un extremo de la barra al otro.



Actividad por equipos

Convección y conducción. Necesitarán un vaso de precipitados de 750 ml para llenarlo con agua. Además, un calentador de agua de resistencia de inmersión, y un termómetro lo suficientemente largo como para que pueda sumergirse por completo en el agua. Coloquen el calentador en el fondo del recipiente y observen las corrientes de convección en el agua. Ahora, enfríen nuevamente el agua o sustituyanla por agua a temperatura ambiente. Coloquen el calentador, sosteniéndolo de manera que quede apenas por debajo de la superficie del agua. En este caso el agua calentada, de menor densidad, no baja, por lo que no se observan corrientes

¹ Sirven para permitir que el aire caliente por el foco circule hacia arriba y permita la convección.

de convección. Así, el hecho de calentar el agua por la parte de arriba implica conducción; en tanto que calentarla por abajo implica convección. Ahora hay que repetir ambas experiencias; pero esta vez se mide la temperatura, digamos, cinco minutos después de colocar el calentador.

En el primer caso, con el calentador en el fondo, coloca la punta o bulbo del termómetro apenas por debajo de la superficie del agua y, con el calentador cerca de la superficie del agua, coloca el termómetro en el fondo del vaso (sin tocar el fondo ni las paredes). Toma nota de las respectivas temperaturas después de cinco minutos de calentamiento. ¿Cómo es la variación de la temperatura entre una y otra medición? Es evidente que en el caso de los fluidos, el proceso de convección es mucho más rápido que el proceso de conducción. Ahora, para enfriar las latas de refresco vemos que en algunos puestos ambulantes colocan los botes encima de un bloque de hielo, dando así la apariencia de frescura. Pero, ¿es ésta la mejor forma de enfriar un fluido? ¿Dónde habría que poner el hielo para lograr un enfriamiento más eficiente?²

Ejemplo

- ¿Cuáles procesos de transferencia de energía están involucrados: a) si estando abrigado pierdes calor hacia un medio ambiente frío desde tu cuerpo? b) cuando vas del interior de tu casa hacia el exterior en un día frío? c) cuando calientas con la flama de una estufa un recipiente con agua y frijoles para cocerlos?

Solución:

a) Tu cuerpo está a mayor temperatura que el medio ambiente y cede calor; por estar en contacto con lo que nos abriga, lo perdemos por *conducción* a través del material que nos cubre, ya que sus partículas sirven como base para transmitirlo. En seguida, el aire circundante gana energía térmica por lo que disminuye su densidad y es desplazado por otra capa de aire más denso y de baja temperatura, continuando este proceso; mientras perdemos calor hacia el medio ambiente. Entonces, es transferencia por *convección* en el aire del medio.

b) Dentro de tu casa puede haber varias fuentes de calor; entre ellas, sus habitantes. El aire interior gana energía térmica por *convección* al estar en contacto con ellos y, debido a su movimiento de capas, lo transfiere hacia las paredes de la casa. Luego, la mayor temperatura de la superficie interior que la exterior de las paredes provoca que éstas transfieran por *conducción* y, por último, tenemos *convección* hacia el aire exterior.

c) La fuente de energía es la flama de la estufa que calienta la superficie exterior del recipiente y se trasmite hacia el agua por *conducción*. El agua en contacto con esta superficie se calienta y cambia su densidad, siendo desplazada por otra más densa y de menor temperatura, de manera que se lleva a cabo la *convección*. A medida que se calienta el agua, se transfiere energía a los frijoles para calentar su superficie exterior, de manera que es la *conducción* la que cuece los frijoles, de ahí que las capacidades caloríficas de diferentes variedades de frijol determinan su tiempo de cocimiento.

² En este proceso el agua fría tiene una mayor densidad, por lo que es muy difícil que suba; el enfriamiento sería por conducción. El hielo debería ponerse encima de las latas de refresco para que el líquido frío de mayor densidad se hunda y se de enfriamiento por convección.



Problemas propuestos

9. La transferencia de calor por _____ se lleva a cabo en sólidos más bien que en fluidos, ya que en estos últimos la transferencia es por _____.
10. Cuando estamos en la playa tenemos transferencia de energía con la arena, el agua y el aire ambiental. ¿qué mecanismo de transferencia de calor se utiliza en cada caso?
- _____
- _____
11. Los vientos se deben al movimiento del aire en las capas de la atmósfera terrestre causado por calentamiento, entonces es transferencia de calor por:
- a) Conducción b) Convección
12. El calor que nos llega del sol utiliza un proceso de:
- a) Conducción b) Convección c) Ninguno de los anteriores
13. La carne se cocina más fácil si se atraviesa con una varilla metálica para conducir el calor más rápido hacia dentro de la carne y no quede cruda. Así, se transfiere por:
- a) Conducción b) Convección



Problemas complementarios

3. La capacidad calorífica también puede reportarse en $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$. ¿Cuál es la equivalencia para pasar a estas unidades a partir de $\frac{cal}{gr \cdot ^\circ C}$?
4. Nuestro cuerpo produce energía calorífica y es necesario disiparla para evitar una excesiva elevación de temperatura. La sangre es el fluido que la transfiere de un sitio a otro al moverse a través del cuerpo. Contesta las siguientes preguntas:
- a) La sangre transfiere calor por _____

- b) La energía calorífica es transferida a los músculos y la piel por _____.
- c) El cerebro está sumergido en fluido espinal y rodeado a la vez por el cráneo; por lo tanto, pierde calor primero por _____ y después por _____.
5. El interior del horno de una estufa está a 200°C y podemos introducir la mano para mover o sacar alimentos en él sin sufrir daño mientras no toquemos sus componentes. Como el aire del interior está próximo a la temperatura del horno, ¿por qué no nos quemamos?
- _____
- _____

2.4.3 Dilatación térmica



Actividad

Consigue un anillo de metal (cualquier rondana o aro funcionará correctamente). Al calentar la rondana o el aro, ¿el hoyo se hace más pequeño o más grande? ¿No pasa nada? Ahora corta la rondana o el aro en un solo lugar, de manera que quede como una letra “c”. La distancia entre los extremos del círculo o aro, ¿se acorta, se amplía o permanece igual? La explicación de lo que ocurre la podrás dar después de estudiar esta sección.

La manera en que se lleva a cabo el proceso de conducción nos sirve para explicar otro fenómeno térmico común: la dilatación de los cuerpos al aumentar su temperatura, la cual recibe el nombre de *dilatación térmica*. Como se ha mencionado en varias ocasiones, en un sólido sus partículas —átomos o moléculas— se encuentran en posiciones fijas, respecto de las cuales se encuentran vibrando. Al aumentar su temperatura, las vibraciones aumentan en amplitud y, al “empujarse” entre sí, las partículas tienden a separarse; esto es, las distancias entre ellas aumenta, por lo que el volumen de la sustancia, a nivel macroscópico, registra un aumento. Se trata del fenómeno de la dilatación térmica.

La dilatación se puede dar de diferentes maneras según la forma y simetría del objeto. Por ejemplo, un alambre delgado y una varilla, cuya longitud sea mucho mayor que su diámetro, registran principalmente una *dilatación longitudinal*, que se aprecia como un aumento de su longitud; mientras que un objeto como una lámina, registra una *dilatación superficial*, que se evidencia por un aumento en su área. La *dilatación volumétrica* se da cuando el volumen de un cuerpo aumenta como un todo.

La dilatación térmica es la causa de que en algunas construcciones se dejen ciertas separaciones entre los puntos de unión de los materiales. De igual manera, en las vías del tren, hay una separación entre un riel y otro, para permitir una dilatación térmica sin problemas. Si no existiera tal separación, los rieles acabarían por deformarse y levantarse.



Todos los materiales se comportan de la misma manera: si su temperatura aumenta se dilatan; y si su temperatura disminuye, se contraen. Sólo existe una excepción al respecto: el agua. El agua se comporta al revés, en cierta región de temperaturas, se dilata al disminuir la temperatura y se contrae al elevarse la temperatura. Este fenómeno ocurre entre los 0 °C y los 4 °C. Cuando la temperatura aumenta de 0 °C hasta los 4 °C, el agua se contrae y alcanza su densidad máxima a esa temperatura. Por ello el agua sólida, es decir, el hielo, es menos densa que el agua líquida, y por eso flota.

La causa de este fenómeno es la naturaleza eléctrica de las moléculas del agua. Por su forma, la molécula de agua tiene un extremo, donde se encuentra el átomo de oxígeno, con carga dominante negativa; mientras que en el extremo donde se encuentran los átomos de hidrógeno la carga dominante es positiva. En otras palabras, la molécula de agua es un dipolo eléctrico, es decir, es una molécula bipolar. Cuando el agua se encuentra en fase líquida, las moléculas tienen una buena cantidad de energía y se mueven unas respecto de otras, de manera que la interacción eléctrica no es muy notoria. En cambio, cuando el agua líquida comienza a solidificarse, las moléculas pierden movilidad y, por su interacción eléctrica, se acomodan de acuerdo con la regla de las cargas eléctricas (cargas de igual signo se repelen y cargas de signos opuestos se atraen), dejando huecos entre ellas con el consiguiente aumento en su volumen. De esta manera, la densidad del agua sólida disminuye.

Este hecho es particularmente importante en lugares donde las temperaturas ambientales son muy bajas en invierno. Por ejemplo, en la ciudad de Chicago las personas tienen que dejar correr el agua en las tuberías de sus casas en invierno, ya que de otra manera el agua estática dentro de las tuberías se congelaría y rompería las tuberías.

Experimentalmente se encuentra que la dilatación térmica es directamente proporcional a la variación de la temperatura del objeto considerado, así como también es directamente proporcional a su dimensión original. También se observa que objetos de diferentes materiales se comportan de manera diferente. Expresando matemáticamente estos resultados, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (2.1)$$

$$\Delta V = \beta V \Delta T \quad (2.2)$$

donde ΔT representa el cambio en la temperatura; Δl y ΔV el cambio de longitud y el cambio de volumen, respectivamente; l y V , la longitud y el volumen originales; y α y β se denominan coeficiente de dilatación lineal y coeficiente de dilatación volumétrica, respectivamente. Estos coeficientes son característicos de cada material; en la tabla 2.1 se presentan algunos coeficientes de dilatación para distintos materiales.

Tabla 2.1 Coeficientes de dilatación térmica para diversas sustancias y materiales

Material	Coeficiente de dilatación lineal (°C) ⁻¹	Coeficiente de dilatación volumétrica (°C) ⁻¹
Hierro	11×10^{-6}	33×10^{-6}
Vidrio	8.5×10^{-6}	26×10^{-6}
Vidrio pyrex	3.3×10^{-6}	10×10^{-6}

Material	Coefficiente de dilatación lineal (°C) ⁻¹	Coefficiente de dilatación volumétrica (°C) ⁻¹
Concreto	12×10^{-6}	36×10^{-6}
Plomo	29×10^{-6}	87×10^{-6}
Mercurio		182×10^{-6}
Glicerina		485×10^{-6}
Gasolina		960×10^{-6}
Alcohol metílico		1134×10^{-6}
Aire		3670×10^{-6}
Bióxido de carbono		3740×10^{-6}
Hidrógeno		3660×10^{-6}

Ejemplo

- Determina el tipo de dilatación que ocurre en cada uno de los siguientes casos al aumentar su temperatura: a) las vías del tren, b) las losas de concreto de una calle y c) el aire contenido en un globo.

Solución:

- a) Para las vías del tren, al estar expuestas al medio ambiente son sometidas a altas y bajas temperaturas y su longitud cambia. Por su *dilatación lineal* se debe dejar un espacio entre rieles consecutivos y así evitar su deformación.
- b) Las losas de concreto, al igual que las vías, se encuentran a la *intemperie*, pero se dilata más su superficie (dos dimensiones). Por su *dilatación superficial* debe dejarse un espacio alrededor de losetas consecutivas al construir un camino, calle o carretera.
- c) El aire contenido en un globo, por ser un fluido (gas), no puede considerarse que se dilate más en una o dos dimensiones, ya que lo hace en sus tres dimensiones. Por lo tanto, se trata de *dilatación volumétrica* para el gas dentro del globo y podemos agregar *dilatación superficial* para solo el globo. Estrictamente, la dilatación de todos los materiales ocurre en sus tres dimensiones; sin embargo, debido a la geometría de cada caso, se observa que es mayor en una o dos de sus dimensiones para los sólidos; para los fluidos (líquidos y gases) debemos considerar sus tres dimensiones.

Ejemplo

- Dos losas de concreto de 3.0 m de longitud cada una, formarán el patio de separación entre dos edificios y se construyen un día cuya temperatura es 25 °C. ¿Qué espacio entre las losas debe dejarse para su libre dilatación si la temperatura llega a 40 °C? No considere el espesor de la losa.

Solución:

La dilatación que tiene una losa en el intervalo de temperatura dado es:

$\Delta l = \alpha l \Delta T = (12 \times 10^{-6})(3.0)(15) = 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}$; pero debemos considerar que cada losa se dilata individualmente para dejar el espacio correspondiente a las dos: $2(5.4 \times 10^{-4} \text{ m})$, es decir, 1.1 mm.

Ejemplo

- Un puente construido de acero une una población con la entrada de una bahía y mide $1.30 \times 10^3 \text{ m}$ entre las torres de apoyo. ¿Cuánto se dilatará el puente durante un día en que la temperatura tenga un incremento de $30 \text{ }^\circ\text{C}$?

Solución:

Usando el coeficiente del acero $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, calculamos su dilatación:

$\Delta l = \alpha l \Delta T = (12 \times 10^{-6})(1.30 \times 10^3)(30) = 0.47 \text{ m}$, con este valor nos damos cuenta de los grandes espacios para la dilatación de los puentes.

Ejemplo

- Una lámina de acero estructural de 2.00 m por 4.00 m sirve para cubrir una zona de trabajo, donde sufre cambios de temperatura hasta de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuál será el incremento en el área de dicha placa?

Solución:

La lámina se dilata tanto a lo largo como a lo ancho, por lo que el cambio en el área, ΔA , será $\Delta A = \Delta l_1 \Delta l_2$, con lo que se demuestra que $\Delta A = 2\alpha A \Delta T$; esto es, el doble de la dilatación lineal, cuya relación nos da la dilatación superficial, sustituyendo: $\Delta A = 2(12 \times 10^{-6})(2.00)(4.00)(50) = 9.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Ejemplo

- Un tanque de gasolina de 60.0 lt se llena en la mañana a una temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y se deja estacionado en un lugar donde la temperatura se eleva hasta $40 \text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuál será el aumento de volumen de la gasolina?

Solución:

Usando el coeficiente de dilatación de la gasolina de la tabla tenemos:

$\Delta V = \beta V \Delta T = (960 \times 10^{-6})(60.0)(30) = 1.7 \text{ lt}$. Los tanques actuales son de plástico que se moldea a las cavidades del automóvil y se dilatan, aunque no lo estamos considerando.

Ejemplo

- El sistema de enfriamiento de los motores de los automóviles tienen un recipiente de plástico llamado tanque de recuperación, donde el refrigerante excedente se acumula como resultado del calentamiento del motor y se restituye al enfriarse, evitando así su revisión continua. Si un radiador de aluminio inicialmente vacío se llena con 8.0 lt de refrigerante ($\beta = 400 \times 10^{-6}$) a 5 °C y al funcionar el motor se eleva la temperatura a 95 ° C, ¿cuál será el volumen mínimo del tanque de recuperación? ($\beta_{Al} = 69 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Solución:

En este ejemplo debemos considerar la dilatación tanto del refrigerante como del radiador. Si se dilataran en la misma proporción no se requeriría depósito para el excedente; pero el refrigerante se dilata más. Al observar los valores de los coeficientes, la diferencia en las dilataciones, el volumen excedente será enviado al tanque de recuperación. Así:

Para el refrigerante $\Delta V_{ref} = \beta_{ref} V \Delta T = (400 \times 10^{-6})(8.0)(90) = 0.29 \text{ lt}$ y para el radiador que tiene el mismo volumen: $\Delta V_{Al} = \beta_{Al} V \Delta T = (69 \times 10^{-6})(8.0)(90) = 0.5 \text{ lt}$. Como la diferencia de los cambios de volumen es: $\Delta V = \Delta V_{ref} - \Delta V_{Al} = 0.29 - 0.05 = 0.24 \text{ lt}$, el volumen mínimo del tanque debe ser de 0.24 lt.



Problemas propuestos

14. Para los siguientes incisos, determina el tipo de dilatación térmica a considerar cuando aumenta la temperatura de:
- La puerta de tu casa _____
 - Las líneas telefónicas _____
 - Tu cabello _____
 - La gasolina dentro de un tanque _____
 - El mercurio del termómetro _____
 - El hueso del muslo (fémur) _____
 - Una esfera de acero _____
 - El vidrio de una ventana _____
15. Para evitar que el calzado que usamos nos apriete el pie y si tuviéramos que comprarlo por temporada, ¿cuál sería la más adecuada para hacerlo?
- Invierno
 - Primavera
 - Otoño
 - Verano

- 21.** Para ajustar por presión una varilla de acero de radio 1.0013 cm en un orificio de una placa del mismo material, se hace el orificio en la placa de 1.0000 cm de radio y después se enfría la varilla hasta que pasa por el orificio, para que al aumentar la temperatura de la varilla quede sujeta a la placa. ¿Cuántos grados debe enfriarse la varilla? ¿Podrán ser separados si se enfrían ambos? ¿Y si se calientan?

Solución:

- 22.** Un vaso de vidrio pyrex de 0.100 lt se llena con mercurio a 20 °C. El medio ambiente eleva la temperatura a 35 °C. ¿Cuántos gramos de mercurio se derraman?

Solución:

- 23.** Una casa tiene un volumen total de 600 m³ a una temperatura ambiente de 20 °C. ¿Cuánto aire entra o se desaloja de la casa, si la temperatura disminuye a 0 °C? Considerar el cambio de volumen de la casa despreciable.

Solución:

24. Un carro tanque transporta 46,000 lt de gasolina que fue almacenada a 30.0 °C y viaja para entregar su carga en un sitio donde la temperatura desciende 0.0 °C. ¿Cuántos litros de gasolina entregará a la estación?

Solución:



Problemas complementarios

6. Al tratar de quitar una tapa metálica de un envase de vidrio es común que no podamos hacerlo fácilmente; pero si calentamos la tapa en agua caliente se puede lograr. ¿A qué se debe esto? _____
7. Imagina un tipo de vidrio que tuviera el mismo coeficiente de dilatación que el mercurio. Al construir un termómetro con él, ¿qué lectura daría? _____
8. Dos barras a la temperatura de 20.0 °C tienen la misma longitud. Una es de cobre y la otra de aluminio. Si esta última se calienta hasta 70.0 °C ¿a qué temperatura se deberá calentar la otra barra para que tengan la misma longitud? ($\alpha_{cob} = 17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Solución:

9. Un tanque de acero de 1.000 metros de radio y 5.000 m de altura se utiliza para almacenar alcohol metílico y se llena cuando el ambiente está a 10.0 °C. Si la temperatura ambiental de la fábrica puede alcanzar los 40.0 °C, ¿cuánto alcohol se derramaría si se alcanza esta temperatura?

Solución:

10. En un experimento para determinar el coeficiente de dilatación de un metal, se utiliza una varilla de 0.5000 m y se calienta desde 20.0 °C hasta 100.0 °C. Su incremento de longitud es 0.0095 mm. ¿Cuál es su coeficiente de dilatación lineal?

Solución:

Dilatación Térmica	{	Lineal: $\Delta l = \alpha l \Delta T$ aumento (disminución) de la longitud
		Superficial: $\Delta S = \sigma S \Delta T$ aumento (disminución) del área
		Volumétrica: $\Delta V = \beta V \Delta T$ aumento (disminución) del volumen

2.4.4 Cambios de fase

De estos fenómenos siguen otros denominados *cambios de fase*. Definimos una fase como un estado de agregación molecular. Esto es, la manera en que se agregan o agrupan las partículas de un cuerpo. Así, tenemos las fases más comunes en nuestro medio ambiente: sólida, líquida y gaseosa. La diferencia esencial entre una y otra, *para la misma sustancia*, es su temperatura.

Ahora, si la diferencia esencial entre fases para una misma sustancia es su temperatura, entonces el estado de agregación tiene que ver con el contenido energético de las partículas. ¿Cómo es el contenido energético de la fase sólida con respecto a la fase líquida? Por supuesto que menor. ¿Y el contenido energético de la fase líquida con respecto al de la fase gaseosa? También menor. Por consiguiente, la energía cinética de las partículas es diferente en cada fase. En un sólido la energía cinética de translación es cero, por lo que las partículas se encuentran en reposo en posiciones fijas.

En cambio, en la fase líquida, la energía cinética de translación de las partículas ya es diferente de cero, por lo que éstas se mueven unas con respecto a otras, aunque permanecen juntas por efecto de fuerzas de cohesión. Por eso es que los sólidos tienen forma y volumen definidos, mientras que los líquidos no los tienen y decimos que los líquidos toman la forma del recipiente que los contiene.

Por su parte, en la fase gaseosa la energía cinética de translación alcanza valores lo suficientemente grandes como para vencer las fuerzas cohesivas y, entonces, las partículas se separan a causa de su movimiento más rápido y violento.

La fase sólida es menos caliente que la líquida y ésta menos caliente que la gaseosa. Los cambios de fase se dan, entonces, cuando una sustancia pasa de una fase a otra, por una transferencia de calor. Por ejemplo, al pasar de fase sólida a líquida (fusión) la sustancia absorbe energía; mientras que en caso contrario (solidificación), la sustancia libera energía.



El caso de la evaporación o vaporización merece una mención aparte. En un primer acercamiento, cuando un líquido se vaporiza pasa por el proceso de ebullición, el cual se lleva a cabo de la siguiente manera. Las moléculas de agua, que se encuentran en contacto directo con la superficie del recipiente, a la vez están en contacto directo con la flama, reciben una cantidad de energía que, cuando se supera la convección, empiezan a moverse de forma más violenta, empujando a sus vecinas más próximas y generando un espacio vacío alrededor de ellas: entonces se forman las burbujas. Como éstas son mucho menos densas que el resto del líquido circundante, se despegan de la pared del recipiente y suben a la superficie.

Si la energía de las moléculas que forman la burbuja es lo suficientemente grande, las moléculas podrán romper la tensión superficial y salir fuera del seno del agua. Además, la energía debe ser lo suficientemente grande como para superar la presión atmosférica. (Suponemos que el agua se ha colocado “a cielo abierto”.) Si todo eso pasa, las moléculas escapan y decimos que se produce vapor de agua, fenómeno conocido como evaporación.

De este modo, la evaporación tiene que ver con la presión externa. Se trata de una situación evidente porque, a nivel del mar, los puntos de ebullición son mayores que los puntos de ebullición a grandes alturas por sobre el nivel del mar. Por ejemplo, a nivel del mar, en el ecuador, el agua hierve a 100 °C; mientras que en Guadalajara, el punto de ebullición es, aproximadamente, 98 °C. ¿Cuál es la razón de este hecho?³

³ Para que se de la evaporación que acompaña necesariamente la ebullición, deben suceder dos cosas. Primero, las moléculas de agua que escapan tienen que romper la tensión superficial y, segundo, deben vencer la presión atmosférica. A nivel del mar, la presión atmosférica es mayor, por lo que necesitan mayor energía cinética que en Guadalajara.



Actividad por equipos

En un recipiente coloquen una cantidad de agua no muy grande. Un vaso de precipitados de 400 ml o menos es suficiente. Pongan el agua al mechero y, cuando comience a hervir, tomen cuidadosamente la temperatura. Hagan mediciones de la temperatura mientras el agua se encuentra en ebullición, a diferentes intervalos de tiempo; por ejemplo, a los dos minutos y a los cuatro minutos. ¿Se encuentra variación en la temperatura? ¿Por qué sucede así?

Ejemplo

- Es común que al pedir alguna, bebida la queramos fría o que esté bien “sudada”, que es un término que se utiliza cuando hay condensación de agua del medio ambiente sobre el recipiente. ¿En realidad está más fría que si no tuviera agua sobre la superficie del recipiente?

Solución:

Ya establecimos que los cambios de fase implican transferencia de energía y como en el medio ambiente hay vapor de agua, las moléculas del aire y del agua, al estar en contacto con el recipiente a baja temperatura, ceden calor. Las moléculas del aire no se condensan, pero las de agua sí, lo cual es evidente porque gradualmente aparece agua condensada sobre el recipiente (está sudado). Para condensarse el agua (de vapor a líquido) requiere perder calor o, dicho de otra forma, ceder energía a aquello que esté en contacto con ella. En este caso, el recipiente gana el calor cedido por el agua y aumenta su temperatura, por lo que la condensación es un proceso de calentamiento para el recipiente y el entorno. Entonces, cuando la bebida está bien “sudada” estará menos fría.

Ejemplo

- Nadie esta exento de enfermarse y de emplear jeringas en muchas ocasiones para la aplicación de medicamentos. Hemos notado que en la zona del cuerpo donde se utiliza la jeringa, como antiséptico se aplica alcohol etílico con un pedazo de algodón. Sin embargo, notamos que dicha zona se enfría. ¿Por qué ocurre eso?

Solución:

El pedazo de algodón forma una película de alcohol sobre la piel y, como éste es muy volátil, para evaporarse gana calor de la piel, que está a mayor temperatura; por lo que enfría la zona de aplicación. ésta al mismo tiempo pierde un poco de sensibilidad. La evaporación es un proceso de enfriamiento para el medio circundante.

Ejemplo

- ❑ Desde pequeños hemos visto documentales y al visitar el zoológico observamos que los elefantes se rocían agua sobre sí mismos y la idea de que son muy aseados nos viene a la mente por que parecen estar “bañándose”. ¿Es esto cierto?

Solución:

Al aumentar la temperatura del cuerpo del elefante, y sin tener glándulas sudoríparas para generar sudor, se enfría al evaporarse el agua sobre su piel. Esto es, el elefante requiere mojar su superficie corporal para enfriarse de manera artificial por evaporación y bajar su temperatura. Parece entonces que no son muy aseados; más bien lo hacen por necesidad. El ser humano es de los pocos animales que tienen glándulas sudoríparas.



Problemas propuestos

25. Cuando tenemos sobre nuestro cuerpo ropa mojada para refrescarnos en época de calor, no sólo sentimos menos el calor del medio, sino que muchas veces hasta tenemos frío. ¿A qué se debe esto? _____

26. Cuando tomamos bebidas con hielo, mientras hay hielo sabemos que está fría, pero cuando ya no se observa el hielo, ¿seguirá estando fría? ¿La fusión del hielo es un proceso de enfriamiento o de calentamiento para la bebida?

¿Por qué? _____
27. Algunas cantimploras están recubiertas de tela. Si la llevas a una excursión, ¿cómo puedes mantener frío su contenido sin usar hielo? _____

28. Después de lo analizado con el ejemplo del elefante aseado, ¿al hacer deporte es conveniente quitarse el sudor del cuerpo? ¿Por qué? _____

29. Los cerdos buscan sitios con lodo; entonces ¿les gusta estar sucios? _____

¿Por qué? _____

30. Un día frío no es muy agradable y menos cuando, además, llueve; pero ¿haría menos frío si estuviera completamente despejado? _____
¿Por qué? _____
31. El ser humano se baña por aseo. Si lo hace con agua caliente en un sitio cerrado no sentirá frío al cerrar la llave de la regadera y secarse; pero si se sale del sitio en cuanto termina su baño, sentirá frío. ¿Por qué? _____



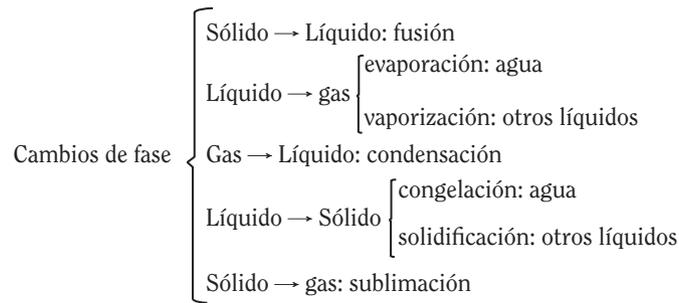
Problemas complementarios

11. Lee cuidadosamente los siguientes enunciados y contesta **F** si es falso o **V** si es verdadero según corresponda:
- a) Siempre que se suministre calor a una sustancia, debe aumentar siempre su temperatura. _____

- b) Siempre que se suministre calor a una sustancia no necesariamente aumenta su temperatura. _____

12. Para soportar un viaje por el desierto es común almacenar agua en bolsas de lona, la cual permite que se disperse muy lentamente a través de ella el agua. ¿Qué efecto tiene esto en la temperatura de la bolsa de lona? _____

13. Algunos acondicionadores de aire para interiores hacen pasar el aire a través de una fina malla filtrante húmeda. ¿Qué efecto tiene en la temperatura del aire? ¿Este sistema funcionaría adecuadamente al pasar aire de un clima húmedo? _____



2.4.5 Transferencia de calor por radiación



Pregunta previa

¿En qué consiste el movimiento térmico de las partículas que componen un objeto?

Es indudable que del Sol nos llega energía térmica que calienta todo lo que se encuentra en la Tierra. El calor del Sol fluye a la Tierra a través del espacio vacío, luego a través de la atmósfera y finalmente llega a la superficie terrestre. Ninguno de los procesos de transferencia de energía térmica analizados se aplica en este caso. ¿Cómo es que nos llega, entonces, la energía térmica proveniente del Sol? La respuesta es que la energía se transmite por *radiación*. Aquí es importante hacer hincapié en que *radiación* no es lo mismo que *radiactividad*, la cual se refiere a las reacciones que involucran al núcleo de los átomos. El término “radiación” se refiere a *radiación electromagnética*, la cual incluye las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Cada uno de éstos es portador de energía que, en términos generales, se denomina *energía radiante*.

Los átomos y las moléculas de los objetos están siempre agitando por su movimiento térmico. Al comportarse de esta manera, emiten o absorben radiación electromagnética. De acuerdo con lo afirmado en el párrafo anterior, la clase de radiación emitida depende de la temperatura. A temperaturas relativamente bajas, la emisión es de los tipos de ondas de radio, microondas e infrarrojo; y a temperaturas mayores, visible o ultravioleta. Así, por ejemplo, el color rojo que vemos en brasas de carbón se debe a la radiación (luz) que está emitiendo la madera por su alta temperatura.



Como nuestros ojos sólo captan la luz visible, no podemos ver toda la radiación térmica emitida por un objeto caliente. Pero ya sea que la veamos o no, la radiación electromagnética es portadora de energía y la transfiere hacia cualquier objeto capaz de absorberla. Ya afirmamos que todos los átomos y todas las moléculas emiten energía radiante en la radiación electromagnética por su agitación térmica, de manera que todo objeto emite radiación electromagnética en una cantidad que depende de su temperatura: a mayor temperatura, habrá mayor emisión de energía radiante.

Una fogata es una buena fuente de energía radiante (en su defecto, un mechero encendido sería un buen sustituto). La radiación electromagnética emitida transmite calor hacia sus alrededores; podemos sentir la energía térmica de la luz infrarroja invisible sobre la piel del rostro al acercarnos moderadamente, y sentir el cambio si interponemos la mano entre el rostro y el mechero. La mano tapa la radiación emitida.



Pregunta

Si te paras debajo de una lámpara con foco de filamento, sientes la energía térmica irradiada, aun cuando la convección se lleve el aire caliente hacia arriba. ¿Por qué sucede esto?⁴

Ejemplo

- ¿Cuál es el mecanismo para transferir calor de un cuerpo caliente a uno frío cuando están separados por : a) Una barra de plata, b) Por un vacío.

Solución:

- a) El cuerpo caliente transfiere energía a través de la barra sólida de plata y sus átomos sirven de medio para transferirlo, por lo tanto, hay *conducción de calor*.
- b) Con el vacío no hay un medio sólido para que haya conducción, ni tampoco un fluido para que se transfiera por convección; por lo tanto, se transfiere por *radiación*, ya que puede viajar a través del vacío como la energía que nos llega del Sol.

Ejemplo

- El cuerpo humano tiene una temperatura promedio de 37.0 °C y cuando está en contacto térmico con el medio ambiente hay intercambio de calor. ¿Cuándo se comporta como un emisor neto de calor? ¿Y cuándo como un absorbente neto?

Solución:

Al estar en contacto con el ambiente fluye calor hacia y desde el cuerpo. Si perdemos más de lo que ganamos, somos un emisor neto; si ganamos más de lo

⁴ Por la radiación. Un foco de filamento emite grandes cantidades de luz infrarroja invisible; aunque esta luz es invisible al ojo humano, se puede sentir sobre la piel.

que perdemos, somos un absorbente neto. Como el calor fluye de mayor hacia menor temperatura, el entorno determina qué somos. Si la temperatura del entorno es menor que la del cuerpo, somos emisores netos de radiación térmica y baja nuestra temperatura; si la temperatura del entorno es mayor que la nuestra, somos absorbentes netos de radiación térmica y nuestra temperatura aumenta. Este razonamiento nos ayuda a explicar lo que ocurre también con los objetos a nuestro alrededor.

Transferencia de Calor (Q)	Conducción: entre sistemas en contacto. Q fluye del de mayor temperatura al de menor temperatura.
	Convección: solamente dentro de fluidos. Q es transferido por las moléculas del fluido.
	Radiación: Q es transferido por ondas electromagnéticas.

2.5 Energía interna



Hemos visto que para aumentar la temperatura de una sustancia, es necesario exponerla al calor, y que la capacidad calorífica de cada sustancia tiene un valor único. Esta característica depende de factores microscópicos de cada material. Cuando se le proporciona energía a una sustancia, esta energía es absorbida por los átomos o las moléculas que la componen, de manera que, esencialmente, aumenta el movimiento de cada partícula.

Cada átomo o molécula realiza diferentes tipos de movimiento; por ejemplo, en un sólido, las partículas realizan movimientos de vibración respecto de su posición fija; mientras que en un líquido, además de los movimientos de vibración propios, también tienen movimientos de traslación. La energía proporcionada se utiliza, entonces, para aumentar cada uno de tales movimientos. Por consiguiente, una molécula de agua, que es más compleja que un átomo de hierro, necesita absorber más energía para modificar sus movimientos, así que la consecuencia es que la capacidad calorífica del agua es mayor que la del hierro.



De acuerdo con lo anterior, cada átomo o molécula constituyente de una sustancia tiene una gran cantidad de energía distribuida en diferentes aspectos de su existencia: cinética, rotacional, potencial gravitacional, potencial eléctrica, etcétera. A la suma de todas las energías de todas las partículas de una sustancia se le

denomina *energía interna* de la sustancia. Para la energía interna utilizaremos, como símbolo, la letra U .

Esto nos explica, también, que no es lo mismo calentar un gramo de agua, por ejemplo, que un kilogramo de agua. Por eso, al referirnos a la capacidad calorífica de una sustancia, hacemos referencia a la cantidad de exactamente un gramo de esa sustancia. La manera de cuantificar la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de un objeto será, entonces, por medio de la ecuación:

$$Q = mc\Delta T$$

donde c es la capacidad calorífica de la sustancia, m su masa, y $\Delta T = T_f - T_i$ el cambio en la temperatura de la sustancia.

Otro aspecto a tomar en consideración respecto de la transferencia de calor es el *color* de la sustancia, el cual funciona de manera análoga a como funciona la capacidad calorífica. Los colores oscuros absorben y emiten calor más rápidamente que los claros. Esto es, el color oscuro es similar a la capacidad calorífica pequeña, y viceversa. Esto es evidente en el caso de vestir prendas oscuras y claras en un día soleado.

Supongamos que traes una playera blanca y un pantalón negro. Al exponerte al Sol en una calle, sentirás que rápidamente el pantalón se calienta y la playera no; al caminar hacia a la sombra, el pantalón se enfría rápidamente respecto de la playera. Con esto puede realizar un experimento simple. Moja dos prendas de vestir del mismo material, una oscura y otra blanca, por ejemplo, algodón, y ponlas a secar al Sol. ¿Cuál de las dos se secará primero? ¿Por qué? Las superficies oscuras absorben la radiación electromagnética, por lo que su energía interna aumenta rápidamente; mientras que las superficies claras reflejan parte de la radiación y absorben otra, por lo que su energía interna aumentará más lentamente.



El arte de tomar café. *El café es considerado por mucha gente como una de las bebidas más atrayentes que existen. Indudablemente, una buena conversación con una taza de café humeante por delante es más deliciosa que sin esta bebida. Para la gente que gusta del café, beberlo es todo un arte. Pero, ¿en qué consiste tal arte? En primer lugar debe enfatizarse que lo primordial es mantener el café caliente durante el mayor tiempo posible. Así, la respuesta a la pregunta anterior sólo puede darse después de contestar las siguientes preguntas. a) Si se toma leche o crema (líquida) con el café, en qué momento es mejor agregársela para mantener la mezcla a la mayor temperatura durante más tiempo, ¿cuándo sirven la taza de café y luego beberlo, o justo antes de comenzar a beberlo? b) La cuchara para agitarlo después de agregar azúcar, ¿debe ser toda metálica, de metal con el mango de baquelita, de plástico o de madera?, c) El material con que está hecha la taza, ¿tiene que ser porcelana, poliestireno (en algunos lugares conocido como hielo seco), barro o metal? d) El color de la taza, ¿debe ser claro por dentro y oscuro por fuera, oscuro por dentro y claro por fuera, todo clara, todo oscuro?*⁵

⁵ a) En el momento en que se sirve, ya que el color claro irradia menos energía que el color negro. b) Lo mejor sería de madera, pero como no son usuales, elegimos plástico; pero como no son estéticas, nos quedamos con metal-baquelita. c) Porcelana, por supuesto, que es el material con que se hacen los crisoles. d) Toda clara.

Ejemplo

- Se deja un recipiente con 1 kg agua expuesto al Sol y después de cierto tiempo se observa que su temperatura aumento en 15 °C. ¿Cuánto calor ganó el agua? ¿En qué cantidad aumentó su energía interna?

Solución:

La capacidad calorífica del agua es $1 \frac{\text{cal} \cdot \text{gr}}{^\circ\text{C}}$, la masa de 1 000 gr y $\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$;

entonces, $Q = mc\Delta T = (1\ 000 \text{ gr})(1 \frac{\text{cal} \cdot \text{gr}}{^\circ\text{C}})(15 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.5 \times 10^4 \text{ cal}$. Esta cantidad de calor al ser ganada por el agua corresponde al aumento en su energía interna.

Ejemplo

- Un deportista de 70.0 kg, al trotar durante cierto tiempo, puede generar $2.0 \times 10^5 \text{ cal}$, que se transfieren al medio por diferentes mecanismos para mantener estable la temperatura del cuerpo. Si no se eliminara esta cantidad de calor, ¿en cuánto aumentaría la temperatura del cuerpo? La capacidad calorífica promedio del cuerpo humano es $0.840 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Solución:

Despejando, $\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{2.0 \times 10^5 \text{ cal}}{(7.00 \times 10^4 \text{ gr})(0.840 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}})} = 3.4 \text{ }^\circ\text{C}$; este aumento de

temperatura haría que el cuerpo llegara arriba de 40 °C .

Ejemplo

- Supón que una persona emplea 120.0 kg de agua para bañarse y utiliza un calentador al que entra agua a 15 °C y sale a 60 °C. ¿Qué cantidad de calor se requiere para calentar el agua?

Solución:

$Q = mc\Delta T = (1.20 \times 10^5 \text{ gr})(1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}})(60 - 15) \text{ }^\circ\text{C} = 5.4 \times 10^6 \text{ cal}$, calor que debe ser

suministrado por el calentador, ya sea de combustible o eléctrico.

Ejemplo

- Una joven que sigue una dieta cuida que su alimentación sea cercana a 2.10×10^6 cal por día y procura gastarlas en sus actividades cotidianas, lo cual finalmente termina siendo calor disipado al ambiente. ¿Cuántos joules por segundo disipa su cuerpo?

Solución:

Lo que consume de energía por día cuida de gastarlo en sus actividades por cada día. Entonces, es un cálculo básico de conversión. En este ejemplo, recuerda que joules por segundo es potencia en watts; utilizando los factores adecuados tenemos:

$$P = \frac{W}{t} = \left[2.10 \times 10^6 \frac{\text{cal}}{\text{día}} \right] \left[\frac{\text{día}}{24 \text{ h}} \right] \left[\frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} \right] \left[\frac{4.186 \text{ J}}{\text{cal}} \right] = 102 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 102 \text{ W},$$

de lo anterior se nota que la joven disipa energía al mismo ritmo que un foco de 100 W que permanece todo el día funcionando.

Ejemplo

- Se tiene un recipiente de cobre de 0.200 kg que contiene 0.300 kg de agua a la misma temperatura inicial de 15.0°C . Se introducen en el agua 45.0 gr de un material del que se desconoce su capacidad calorífica c_x y que fue calentado previamente a 95.0°C . Posteriormente, al medir la temperatura de equilibrio final de recipiente-agua-material alcanzada, se encuentra que es de 20.0°C . Si no consideramos pérdidas al medio ambiente, ¿cuál será la capacidad calorífica del material desconocido? La capacidad calorífica del cobre es $0.092 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Solución:

En este problema debemos notar que el calor perdido por el material es ganado por el agua y el recipiente, de acuerdo con el principio de conservación de la energía. Entonces, el calor perdido por el material es: $Q_{\text{per}} = m_x c_x \Delta T = (45.0 \text{ gr}) c_x (95.0 - 20.0)^\circ\text{C}$ y el ganado será:

$$Q_{\text{gan}} = (200 \text{ gr}) \left(0.092 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (20.0 - 15.0)^\circ\text{C} + (300 \text{ gr}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (20.0 - 15.0)^\circ\text{C}.$$

Igualando $Q_{\text{per}} = Q_{\text{gan}}$, calculamos c_x obteniendo $c_x = 0.472 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}}$.



Problemas propuestos

32. Se tienen dos tazas idénticas con café negro a la misma temperatura, pero una es de tono claro y la otra de tono oscuro. A ambas se les deja dentro de la taza un mismo tipo de cuchara. a) ¿Cuál se enfría más rápido si la cuchara

- 37.** Un calentador eléctrico de inmersión suministra 100.0 W a 500.0 gr de agua que están inicialmente a 15.0 °C. ¿Qué temperatura alcanza el agua después de 30.0 s? Considera despreciable el cambio en el recipiente.

Solución:

- 38.** Al circular la sangre por nuestro organismo gana calor excedente y lo transporta del interior al exterior en la superficie del cuerpo, de donde se transfiere al medio ambiente por diferentes mecanismos. Si al realizar un trabajo fluyen 0,650 kg de sangre a la superficie corporal y se disipan 2.40×10^3 J, ¿a qué temperatura regresará la sangre al interior del cuerpo? La sangre que llega al exterior a 37.0 °C; supón que su capacidad calorífica es igual a la del agua.

Solución:

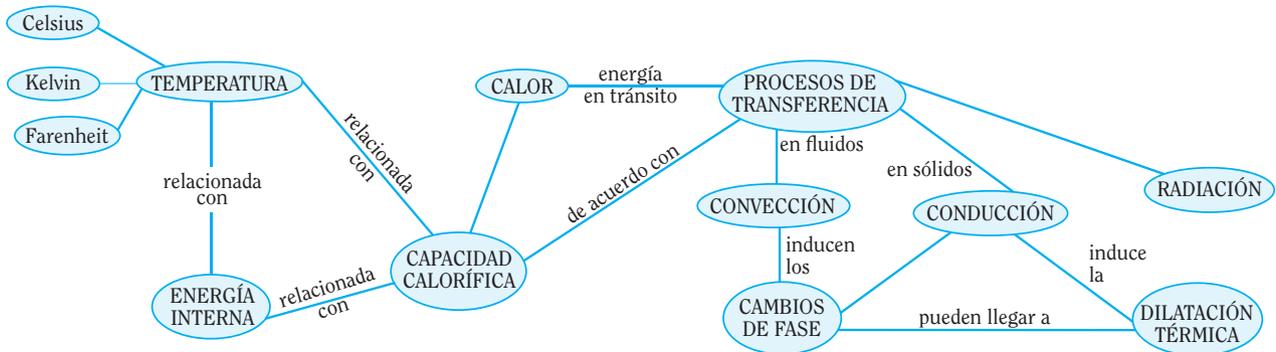


Problemas complementarios

- 14.** Por nuestra experiencia cotidiana y de varias fuentes sabemos que vestirse de color negro en un clima cálido nos “da más calor”. ¿Realmente es cierto eso? ¿Podrías explicar por qué? _____
- _____
- 15.** Dos recipientes idénticos de forma, tamaño y material, están sobre una mesa y en la misma habitación a temperatura ambiente. Uno de ellos es blanco brillante, y el otro es negro mate con un termómetro en su interior cada uno.
- a) Si ambos se llenan con agua a temperatura de ebullición, ¿disminuirá la temperatura por igual en ambos termómetros? Si no es así, ¿cuál se enfriaría más rápido?

b) Si ambos se llenan con agua y hielo en equilibrio, ¿aumentará la temperatura por igual en los dos termómetros? Si no es así, ¿cuál se calentará más rápido?

16. Parecería que la evolución de las especies no tiene nada que ver con las leyes físicas; pero considera la siguiente pregunta. ¿Por qué no hay osos polares café, verdes o rositas? Parece ridícula, pero si en realidad hubieran existido ¿estarían adecuadamente adaptados al medio ambiente en que viven? ¿Qué ocurriría entonces con aquellos que no fueran blancos? Entonces, ¿cuáles fueron los que quedaron con el transcurso del tiempo? ¿Podrías aplicarlo en otros casos?



Mapa Conceptual
Temperatura y Calor

Resumen

El calor y la temperatura son conceptos totalmente diferentes. Concebimos la temperatura como una medida de qué tan caliente se encuentra un objeto; mientras que entendemos el calor como un proceso de transferencia de energía térmica. En esos términos, decimos que el calor es energía en tránsito. La temperatura de un cuerpo se mide de acuerdo con diferentes escalas, dentro de las cuales las más comunes son la escala Celsius y la Fahrenheit. La escala de uso científico es la escala Kelvin o escala absoluta. Por su parte, el calor se mide en unidades de energía, joules; sin embargo, es más común utilizar las unidades denominadas calorías.

Para que se dé la transferencia de energía de un cuerpo a otro, es necesario que ambos se encuentren a diferentes temperaturas; así, el proceso comienza espontáneamente y la energía se transfiere del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan, cuyo estado se conoce como equilibrio térmico. Hay tres maneras en que se transfiere la energía: convección, conducción y radiación. La primera es exclusiva de fluidos (gases y líquidos); mientras que la segunda se lleva al cabo en un sólido o entre sólidos. Cuando hay contacto entre un sólido y un fluido a diferentes temperaturas, la transferencia es por conducción de uno a otro, y dentro de cada uno por el mecanismo exclusivo de cada uno.

Cuando los objetos se calientan les ocurre el fenómeno de dilatación térmica, esto es, su tamaño aumenta. Dependiendo de las condiciones de simetría o de geometría de los cuerpos, la dilatación puede ser volumétrica, superficial o longitudinal. El caso del agua es especial, ya que se contrae al calentarse de 0 °C a 4 °C; a esta temperatura el agua tiene su densidad máxima. A partir de los 4 °C, el comportamiento del agua se vuelve semejante al del resto de las sustancias.

El calor específico o capacidad calorífica es una propiedad característica de las sustancias que se define como la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de la sustancia. Para calcular la cantidad de calor cedido a una sustancia o absorbido por ésta se utiliza la ecuación $Q = mc\Delta T$, donde c es la capacidad calorífica de la sustancia en cuestión.

Bibliografía

- ARONS, A., *Teaching Introductory Physics*, John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1997.
- BLOOMFIELD, L. A., *How things work*, John Wiley and Sons, Inc., 2a. ed., Nueva York, 2001.
- EHRlich, R., *Turning the World Inside Out and Other 174 Simple Physics Demonstrations*, Princeton University Press, Nueva Jersey, 1990.
- FEYNMAN, R., Leighton, R. B. y Sands, M., *Física*, vol. 1, Fondo Educativo Interamericano, México, 1971.
- HEWITT, P. G., Suchocki, J. y Hewitt, L., *Conceptual Physical Science*, Addison Wesley Longman, 2a. ed., Nueva Jersey, 1999.
- KAUFFMAN, P. y Vondracek, M., "The Effect Surface Temperature Has on Kinetic Friction", *The Physics Teacher*, vol. 43, núm. 3, pp. 173-176, marzo de 2005.
- McDERMOTT, L. C., Shaffer, P. S. y Physics Education Group, *Tutorials in Introductory Physics*, Prentice Hall, Nueva Jersey, 2002.
- MILLER, F., Dillon, T. J. y Smith, M.K., *Concepts in Physics*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., Orlando, 1969.
- SWARTZ, C. E. y Miner, T., *Teaching Introductory Physics*, Springer-Verlag Inc., Nueva York, 1998.
- WENHAM, E. J. (ed.), *Nuevas tendencias en la enseñanza de la física. Energía*, vol. IV, UNESCO, 1985.

Unidad 3

ELECTRICIDAD, MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO

3.1 Introducción: estructura de la materia e interacción gravitacional



La definición clásica de materia, “todo aquello que ocupa un lugar en el espacio”, es lo suficientemente adecuada para nuestros propósitos. De esta definición de materia se desprenden algunas de sus propiedades, como la impenetrabilidad, el volumen y la forma (en el caso de sólidos). Asimismo, sabemos que la materia está constituida por moléculas; las moléculas, por átomos; los átomos, por núcleo y electrones; el núcleo, por protones y neutrones; los protones y neutrones, por quarks; y los quarks... ¡todavía no sabemos de que están hechos!

Sabemos también que la materia tiene dos propiedades intrínsecas: masa y energía. Se define energía como la “capacidad para realizar trabajo”, que aunque limitada es útil para nuestros propósitos. Por otra parte, el concepto de masa se define como la medida cuantitativa de la inercia de un cuerpo y no solamente como la cantidad de materia que posee. La masa se conceptúa como la medida cuantitativa de la inercia y de ningún modo debe entenderse como “cantidad de materia”. Este último es un concepto anticuado y obsoleto. (Véase el libro anterior, Física 1.)

La masa, como propiedad, da lugar a la interacción gravitacional descrita por la ley de gravitación universal de Newton:

$$F = G \frac{mm'}{d^2} \quad (3.1)$$

donde m y m' son las masas de los cuerpos en interacción; y d la distancia que los separa. A F le hemos denominado fuerza gravitacional o, simplemente, gravedad. Como la gravedad es una fuerza de acción a distancia, hemos visto también que es conveniente definir un concepto que contiene en sí mismo tal efecto a distancia: el campo gravitacional. De esta manera, de la expresión anterior, se define la intensidad del campo gravitacional mediante la expresión

$$g = G \frac{m'}{d^2} \quad (3.2)$$

por lo que la gravedad queda, en forma compacta, como

$$F = mg \quad (3.3)$$

ecuación que, en analogía con la ecuación de movimiento de la segunda ley de Newton, se interpreta diciendo que la gravedad F aplicada a un objeto de masa m , le produce a éste la aceleración g . Como la intensidad del campo gravitacional tiene unidades de aceleración, también se le conoce como aceleración gravitacional. Es muy importante hacer hincapié en que las ecuaciones 3.1 y 3.3 son dos formas de expresar, una compacta y la otra explícita, la misma ley.

La ecuación 3.3 se podría describir de la siguiente manera:

$$g = \frac{F}{m} \quad (3.4)$$

la cual tiene un significado muy particular: la intensidad del campo gravitacional representa la fuerza gravitacional aplicada por unidad de masa del objeto al que se aplica. De aquí que el concepto de campo gravitacional se utilice para explicar la interacción a distancia. En otras palabras, lo que se quiere decir es que todo objeto, por el simple hecho de tener masa, produce a su alrededor un campo de fuerzas —el campo gravitacional—, que se manifiesta en el momento en que otro objeto entra en su zona de acción. Decimos que la gravedad se aplica por medio del campo gravitacional.

3.2 Estructura de la materia e interacción eléctrica



Actividad

Cómo mover el agua sin tocarla. La gravedad siempre hace que los cuerpos se atraigan entre sí; no obstante, existen los fenómenos eléctricos y magnéticos, cuyas interacciones dan lugar a fuerzas de atracción o de repulsión entre los objetos que interaccionan. Veamos una actividad simple. Utiliza una llave de agua en un lavadero, abriéndola poco, de manera que salga un chorro de agua delgado (toda el agua que utilices recógela en un recipiente y utilízala para regar una planta, lavar un objeto u otra cosa; no la desperdicies). Al mismo tiempo, frota vigorosamente un objeto de plástico, como un peine o una pluma, contra el cabello o contra un trozo de tela de lana. Acerca el objeto al chorrito de agua. ¿Qué sucede con el chorrito? ¿Por qué se altera la trayectoria de caída del chorrito? ¿Es la fuerza de atracción o de repulsión?

Es un hecho experimental que los protones y los electrones poseen otra propiedad intrínseca, además de la masa: la carga eléctrica. Esta propiedad es semejante a la masa en el sentido de que también es la responsable de una interacción, llamada interacción eléctrica. Los historiadores cuentan que el filósofo Tales (624-543 a. C.) fue el primero en descubrir la interacción eléctrica, al observar que si un pedazo de ámbar (una resina fosilizada de color amarillenta-café que se usaba, y se sigue usando, como piedra de adorno en collares y brazaletes) se frotaba de manera vigorosa, adquiría la capacidad de atraer pequeños trozos de materia, como paja o cáscaras de granos. Tales, y los pensadores de su tiempo, observaron que la interacción ámbar-paja sólo ocurría si el ámbar era frotado, y que la capacidad de atracción que adquiría el ámbar iba disminuyendo de manera gradual conforme pasaba el tiempo, sobre todo en días húmedos. Siglos después, el científico renacentista William Gilbert (1540-1603) fue el primero en observar sistemáticamente los fenómenos eléctricos. Gilbert concluyó que muchos materiales, además del ámbar, podían adquirir la capacidad de atraer pequeños pedazos de materia después de ser frotados y fue él quien acuñó el término “eléctrico” a partir de la palabra en griego para ámbar: “elektron”. Eléctrico sólo significaba que poseía propiedades similares a las del ámbar.

Alrededor de doscientos años después, Benjamín Franklin (1706-1790) se interesó en los fenómenos eléctricos y comenzó su estudio después de los cuarenta años de edad, cuando había logrado una fortuna suficiente como para entregarse a los placeres de la investigación

científica y la reflexión filosófica, según lo expresaría él mismo. En 1743, Franklin asistió a la conferencia de un personaje inglés, quien sorprendía a los habitantes de las nuevas colonias americanas con ingeniosas demostraciones sobre los fenómenos eléctricos. Franklin compró al conferencista todo su equipo experimental y empezó a investigar por su cuenta en 1745. Para entonces, los experimentos mostraban que al acercar dos varillas de vidrio frotadas con seda, éstas se repelían entre sí. Lo mismo sucedía entre dos varillas de plástico frotadas con lana. Sin embargo, se observó un efecto de atracción cuando se acercaron una varilla de plástico y una varilla de vidrio.

Lo anterior llevó a la aceptación de la existencia de dos tipos de carga eléctrica: una que se manifestaba al frotar vidrio con seda, y otra que se manifestaba al frotar plástico con lana. Franklin propuso llamarlas cargas positivas y negativas, respectivamente. El que un cuerpo estuviera cargado positivamente significaba que éste sería rechazado por una varilla de vidrio frotada con seda. De manera similar, un cuerpo cargado negativamente significaba que sería repelido por una varilla de plástico frotada con lana. Aquí es importante notar que la designación de “positiva” y “negativa”, para las cargas del vidrio y del plástico, fue completamente arbitraria; Franklin igual pudo decir lo opuesto. Los resultados no se alteran por la asignación de nombres.

A partir de estas observaciones y las suyas propias, Franklin propuso un modelo para explicar la interacción eléctrica que pronto ganó terreno no sólo en América sino en toda Europa. De acuerdo con su modelo, la carga eléctrica se podría considerar un “efluvio” o fluido, y toda la materia tiene la misma cantidad de fluido positivo que de fluido negativo. Sin embargo, tales niveles pueden alterarse con el frotamiento, de tal forma que, si se elimina una cantidad de fluido negativo, el cuerpo quedará cargado positivamente, porque habrá más cantidad de efluviio positivo después del frotamiento. De manera análoga, al agregar fluido positivo, el cuerpo queda cargado positivamente. Completando el esquema (véase la figura 3.1), un cuerpo quedaría cargado negativamente al agregar fluido negativo o eliminar fluido positivo.

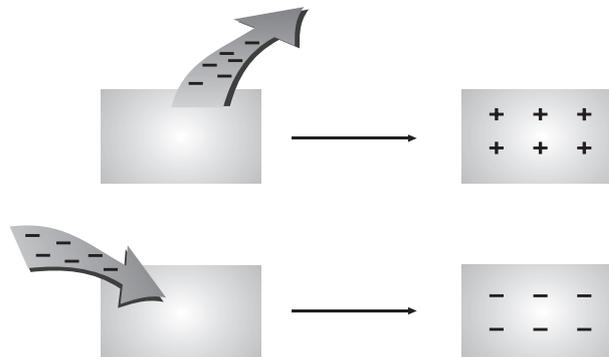


Figura 3.1

Este modelo, al ser revisado a la luz de los conocimientos actuales, es impreciso porque la carga eléctrica no es un fluido. Sin embargo, representa una metáfora elegante de la interacción eléctrica la cual, como metáfora, es básicamente correcta. En terminología actual, podemos modificar el modelo de Franklin de la siguiente manera. Toda la materia está conformada por átomos que, en condiciones normales, tienen igual número de electrones que de protones.

Experimentos posteriores mostraron que el electrón tiene carga negativa; y el protón, carga positiva (de acuerdo con la denominación de Franklin). Por lo que en condiciones nor-

males los átomos son *eléctricamente neutros*. Sin embargo, se pueden “arrancar” electrones a los materiales por frotamiento e, hipotéticamente, también podrían arrancarse protones de los átomos, aunque esto es prácticamente imposible (¿por qué?). Así, un cuerpo queda cargado negativamente cuando recibe electrones y queda cargado positivamente cuando pierde electrones durante el frotamiento. Llegamos, entonces, a la conclusión de que el término *carga eléctrica* es el nombre con que designamos a una propiedad de la materia que, en los cuerpos macroscópicos, se manifiesta cuando el número de protones y electrones que contiene su estructura atómico molecular está desbalanceado.

Todo ello es fácil de entender si hablamos de átomos o moléculas; pero, ¿qué sucede si hablamos de electrones o protones individuales? Y aun más, ¿cómo es la situación eléctrica de los neutrones? En cuanto a los dos primeros, vale la misma definición: la carga es una propiedad intrínseca de la materia y, por consiguiente, se dice que los electrones y los protones *tienen* o *poseen* carga negativa y carga positiva, respectivamente. Por lo que toca a los neutrones, para nuestros fines es suficiente con afirmar que éstos *no* tienen carga. Aquí es importante hacer hincapié en el uso del lenguaje. No es correcto hablar de la carga como si ella tuviera existencia por sí misma. La carga existe como propiedad de la materia. Debemos evitar expresiones como “dos cargas positivas se encuentran separadas...”, o “considera dos cargas negativas...” La forma correcta de expresarse es: “dos objetos con carga positiva se encuentran separados...”, o “considera dos cuerpos con carga negativa...”.



Ahora, de acuerdo con los experimentos mencionados anteriormente, es posible inferir que la interacción eléctrica es de la misma naturaleza que la interacción gravitacional. Dos objetos con carga de distinto signo se atraen, de igual manera que dos cuerpos con masa lo hacen. Pero hay una diferencia. Sólo existe una clase de masa y, por ende, en el caso gravitacional sólo hay una sola clase de interacción, de atracción. Pero como en el caso eléctrico hay dos tipos de carga, debe esperarse que existan dos tipos de interacción posibles: la ya mencionada de atracción, y la de repulsión. De aquí que debe existir una ley que describa la interacción eléctrica, de la misma forma que existe la ley que describe la interacción gravitacional. Si, como afirmamos, las interacciones gravitacional y eléctrica son de la misma naturaleza, entonces, por analogía, inferimos la ley que describe la interacción eléctrica como:

$$F_e = k \frac{qq'}{r^2} \quad (3.5)$$

Ésta se conoce como Ley de Coulomb, en honor a Charles-Augustine Coulomb (1736-1806) científico francés.

La carga, propiedad intrínseca de la materia, es susceptible de medición y en el sistema internacional de unidades sus unidades son los *coulombs*, cuyo símbolo es una “C” (mayúscula, por provenir de un nombre propio). La carga medida del electrón es sumamente pequeña: 1.602×10^{-19} C (en valor absoluto) que es, por supuesto, el mismo valor numérico para la carga del protón. A ese número le damos el símbolo e, es decir, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C. Solamente hay que recordar que la carga del protón será +e; mientras que la carga del electrón será -e.

Observamos que las ecuaciones 3.1 y 3.5 son completamente semejantes, pero existe una diferencia sustancial entre las leyes de gravitación y de Coulomb, dada por el valor numérico de sus respectivas constantes:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

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

En primer lugar nota que, comparativamente, G es significativamente más pequeña que k . Y, en segundo lugar, que en las unidades basta cambiar las unidades de masa por las unidades de carga, lo cual se espera, dada la analogía entre las leyes respectivas.



Pregunta

*Los valores numéricos anteriores muestran que la interacción gravitacional es significativamente más pequeña que la interacción eléctrica. Sin embargo, es un hecho que en el Universo la fuerza dominante es la fuerza gravitacional. ¿Por qué es así?*¹

3.3 Carácter vectorial de la ley de Coulomb



Preguntas previas

¿Qué es una cantidad vectorial? ¿Cómo se representan geoméricamente? ¿Qué es un vector unitario? ¿Cómo se define un vector de posición?

De las discusiones sobre vectores y cantidades vectoriales del curso anterior, *Física 1*, tenemos que las leyes de gravitación universal y de Coulomb, por ser expresiones matemáticas que describen fuerzas, tienen carácter vectorial. El problema es cómo interpretar tal carácter y cómo representarlo en símbolos matemáticos. Comenzaremos con la ley de gravitación universal por ser la más sencilla de las dos, y después generalizaremos el resultado al caso de la ley de Coulomb.

¹ De la ley de Coulomb podemos observar que basta con que uno de los objetos en interacción sea eléctricamente neutro ($q=0$) para que la fuerza entre ellos sea cero. En la naturaleza, los objetos son eléctricamente neutros, por lo que la interacción eléctrica entre ellos es cero.

Lo primero es describir un sistema de referencia bidimensional estándar para el que tomamos uno de los dos objetos como objeto de referencia; es decir, el objeto que situaremos en el origen del sistema de referencia y que consideraremos el que le aplica la fuerza al otro. A tales cuerpos los llamaremos, respectivamente, cuerpo *fuente* y cuerpo *de prueba*. Sea el cuerpo con masa m' (masa fuente) el cuerpo fuente (figura 3.2) y el cuerpo con masa m (masa de prueba) el cuerpo de prueba. La distancia entre ambos cuerpos se mide desde el centro del cuerpo fuente; esto es, desde el origen del sistema de referencia hacia el centro del cuerpo de prueba. Esa manera de medir proporciona la dirección del vector asociado a la distancia entre los cuerpos, al que denotaremos con \vec{r} . Debe notarse que la cantidad r así definida, le confiere simetría esférica al sistema que estamos describiendo. De tal manera que el vector asociado con la distancia (se denomina desplazamiento) entre los cuerpos tiene dirección radial hacia afuera.

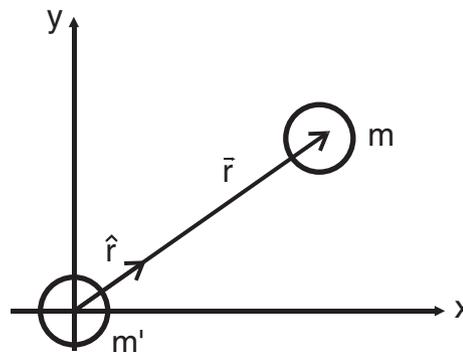


Figura 3.2

Ahora, la ecuación 3.1 expresa solamente la magnitud de la fuerza aplicada al cuerpo de prueba, de manera que F_g está situada, geoméricamente hablando, sobre este cuerpo, y su dirección es sobre la línea que une los centros de los cuerpos; esto es, en la dirección radial hacia adentro, por ser una fuerza de atracción. Si definimos un vector unitario en la forma convencional en la dirección radial, y lo denotamos con \hat{r} , entonces la fuerza gravitacional tiene dirección opuesta a este vector y la ley de gravitación universal queda escrita, en términos vectoriales, como

$$\vec{F}_g = -G \frac{mm'}{r^2} \hat{r}$$

donde el signo negativo indica que la fuerza gravitacional está dirigida en dirección radial hacia el origen.

Para la ley de Coulomb tomamos un sistema de referencia semejante al anterior (figura 3.3) y hacemos una consideración semejante para el cuerpo fuente y el cuerpo de prueba. Siguiendo el mismo proceso que antes, llegamos a la conclusión de que, en términos vectoriales, la ley de Coulomb se escribe como

$$\vec{F}_e = -k \frac{qq'}{r^2} \hat{r} \quad (3.6)$$

donde la fuerza eléctrica tiene la misma dirección que \hat{r} .

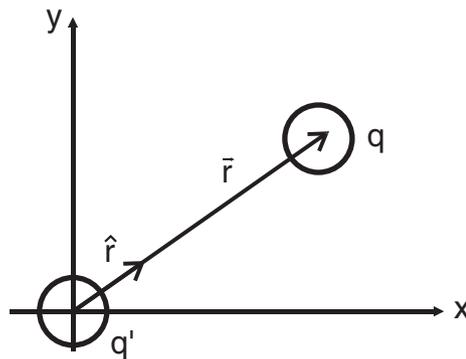


Figura 3.3

La carga q' es la carga del objeto fuente (que también podemos llamar *carga fuente*), que es el objeto que aplica la fuerza al objeto de prueba cuya carga es q . Así, de la figura 3.3 y de la ecuación 3.6, se deduce la ley de los signos de las cargas, de la siguiente manera. Si los cuerpos tienen cargas del mismo signo, positivo o negativo, no se altera la ecuación 3.6, y la dirección de la fuerza sobre el objeto de prueba es hacia afuera; esto es, tenemos una fuerza de repulsión. En cambio, si los cuerpos tienen cargas de signos diferentes, el producto qq' tiene signo negativo y entonces

$$\vec{F}_e = -k \frac{qq'}{r^2} \hat{r}$$



Lo que se interpreta como que la fuerza sobre el objeto de prueba está en dirección radial hacia adentro, o sea, es una fuerza de atracción, como en el caso gravitacional. De aquí que *cargas de signos iguales se repelen* y *cargas de signos opuestos se atraen*.

En este caso que acabamos de discutir, es importante reconocer que el signo negativo en la última ecuación, aunque proviene de una de las cargas, le pertenece a la fuerza \vec{F}_e . Por tal razón lo interpretamos de la forma expuesta.

Ejemplo

- Dos partículas cargadas muy pequeñas están separadas por 5.0 cm y cada una tiene una carga neta de $1.5 \mu\text{C}$. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza eléctrica entre ellas?

Solución:

Calculamos la magnitud de la fuerza eléctrica entre las partículas cargadas con $q=q'$:

$$F_e = k \frac{qq'}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.5 \times 10^{-6})^2}{(5.0 \times 10^{-2})^2} = 8.1 \text{ N}$$

Ejemplo

- Dos pequeñas esferas conductoras con cargas de la misma magnitud, pero de distinto signo, están separadas por una distancia de 0.08 m. La magnitud de la fuerza entre ellas es de 20.0 N. ¿Qué carga tiene cada esfera?

Solución:

Para la magnitud de la carga despejamos q de la ley de Coulomb, y tenemos que $q=q'$,

$$F_e = k \frac{q^2}{r^2}, \text{ donde: } q = \sqrt{\frac{F_e r^2}{k}} = \sqrt{\frac{20.0(0.08)^2}{9 \times 10^9}} = 3.8 \times 10^{-6} \text{ C}$$

Ejemplo

- Dos partículas muy pequeñas tienen cargas netas negativas de $3.0 \mu\text{C}$ y la fuerza entre ellas es de 1.5 N. ¿Qué distancia las separa?

Solución:

$$\text{Despejamos } r = \sqrt{\frac{kq^2}{F_e}} = \sqrt{\frac{(9 \times 10^9)(3.0 \times 10^{-6})^2}{1.5}} = 0.23 \text{ m}$$

Ejemplo

- Para ilustrar la diferencia en magnitudes de las fuerzas gravitacional y eléctrica consideremos dos objetos con cargas iguales de un microcoulomb, que están separados una distancia de tres centímetros. ¿Qué masa debe tener un objeto para sentir una fuerza gravitacional de igual magnitud, si se toma como referencia a la tierra?

Solución:

La fuerza entre los objetos cargados la encontramos por la ley de Coulomb. Con $q=q'=1 \times 10^{-6} \text{ C}$ y $r=0.03 \text{ m}$. Entonces:

$$F_e = k \frac{q^2}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{(1 \times 10^{-6})^2}{0.03^2} = 10 \text{ N}$$

Para encontrar la masa de un cuerpo tal que éste sienta la misma fuerza, hacemos:

$$F = mg \Rightarrow m = \frac{F}{g} = \frac{10 \text{ N}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1 \text{ kg}$$

Es decir, la relación masa-carga es de 1×10^6 , que interpretamos como que en este caso la fuerza eléctrica es, aproximadamente, un millón de veces más intensa que la fuerza gravitacional.

Ejemplo

- En el modelo de Bohr para un átomo de hidrógeno, un electrón gira alrededor del núcleo —un protón— en una trayectoria circular de radio 5.3×10^{-11} m. Determina la fuerza sobre el electrón. ¿Cuál es su rapidez alrededor del núcleo?

Solución:

El electrón es atraído tanto por su masa como por su carga; pero como la gravedad nuclear es despreciable, sólo consideramos la fuerza eléctrica. Si $q=q'$ tenemos:

$$F_e = \frac{kq^2}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N} \text{ dirigida hacia el núcleo. Luego, como}$$

la órbita es circular, esta fuerza hace la función de una fuerza centrípeta. Del movimiento circular recordamos que

$$F_c = m \frac{v^2}{r}, \text{ de donde } v = \sqrt{\frac{F_c r}{m_e}} = \sqrt{\frac{(8.2 \times 10^{-8})(5.3 \times 10^{-11})}{9.1 \times 10^{-31}}} = 2.2 \times 10^6 \frac{m}{s}.$$

Ejemplo

- En la figura se muestran tres partículas cargadas sobre la línea horizontal (eje X). Determina la magnitud y la dirección de la fuerza resultante sobre la carga q .



Solución:

Si denominamos F_1 como la fuerza sobre q debido a q_1 , y F_2 la debida a q_2 , entonces $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Calculamos las magnitudes con la ley de Coulomb:

$$F_1 = k \frac{q_1 q}{d^2} = 9 \times 10^9 \frac{(4.0 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})}{0.25^2} = 4.6 \text{ N}, \text{ vectorialmente } \vec{F}_1 = -4.6 \hat{i} \text{ N}$$

$$F_2 = k \frac{q_2 q}{d^2} = 9 \times 10^9 \frac{(5.0 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})}{(0.10)^2} = 36 \text{ N}, \text{ vectorialmente } \vec{F}_2 = 36 \hat{i} \text{ N}.$$

La resultante es: $\vec{F}_2 = 46 \hat{i} + 36 \hat{i} = 31 \hat{i} \text{ N}$; por lo tanto, la magnitud es de 31 N en dirección positiva del eje X.

Ejemplo

- Una partícula q colocada en el origen coordenado con carga de $8.0\mu\text{ C}$ interactúa con otra partícula q con carga $-6.0\mu\text{ C}$ que se encuentra en $x = 1.20\text{ m}$, $y = 1.40\text{ m}$. ¿Cuál es el vector fuerza de atracción entre ellas?

Solución:

Recordando los vectores usamos la expresión vectorial de la ley de Coulomb:

$\vec{r} = 1.20\hat{i} + 1.40\hat{j}\text{ m}$, y su magnitud $r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{1.20^2 + 1.40^2} = 1.84\text{ m}$; el vector

unitario es: $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{(1.20\hat{i} + 1.40\hat{j})}{1.84} = 0.652\hat{i} + 0.761\hat{j}$. Sustituyendo estos datos en

la ecuación, tenemos:

$$\vec{F}_e = k \frac{qq'}{r^2} \hat{r} = 9 \times 10^9 \frac{(8.0 \times 10^{-6})(-6 \times 10^{-6})}{(1.84)^2} (0.652\hat{i} + 0.761\hat{j}) = -0.083\hat{i} - 0.097\hat{j}\text{ N}$$



Problemas propuestos

1. Dos partículas de polvo tienen cargas netas de $+20\text{ nC}$ y -70 nC , y están separadas por una distancia de 3.0 cm . ¿Qué fuerza existe entre ellas? ¿De atracción o de repulsión?

Solución:

2. Dos esferas conductoras pequeñas e idénticas se encuentran separadas por una distancia de 1 m . Poseen cargas de igual magnitud pero de signo opuesto, y la fuerza entre ellas es F_0 . Si la mitad de la carga de una se transfiere a la otra, entonces la fuerza entre ellas es:

a) $\frac{F_0}{4}$ b) $\frac{F_0}{2}$ c) $\frac{3}{4}F_0$ d) $\frac{3}{2}F_0$ e) $3F_0$

3. Una partícula con carga q se halla a una distancia d de otra partícula con

carga q' . ¿Cuál es la razón $\frac{|F_{12}|}{|F_{21}|}$ si $q' = 2q$?

a) 1 b) 2 c) $\frac{1}{2}$

4. ¿Cuál sería la magnitud de la fuerza de atracción eléctrica que existiría entre tú y un amigo si cada uno tuviera 1.0 C de carga de signo opuesto y se encontraran separados por una distancia de 1.0 m entre sí? ¿Aumentaría la magnitud de la fuerza al disminuir la distancia de separación?

Solución:

5. Tres partículas cargadas se colocan sobre el eje x de la siguiente manera: $q_1 = +30.0\mu\text{C}$ en el origen, $q_2 = +10.0\mu\text{C}$ en $x = +2.5\text{ m}$ y $q_3 = +50.0\mu\text{C}$ en $x = +3.5\text{ m}$.
- a) Determina la fuerza eléctrica resultante (magnitud y dirección) sobre q_2 .
- b) ¿Cuál sería la fuerza resultante, si ahora la carga q_2 es de $-10\mu\text{C}$ en el mismo punto?

Solución:

6. Supón que tu masa es de 70 kg y que te encuentras a una distancia de 1 cm de una placa conductora, por encima de ella. ¿Qué magnitud de carga común deben tener tanto tú como la placa, para que puedas mantenerte suspendido sobre la placa a esta distancia? ¿Deben ser cargas de diferente signo?

Solución:



Problemas complementarios

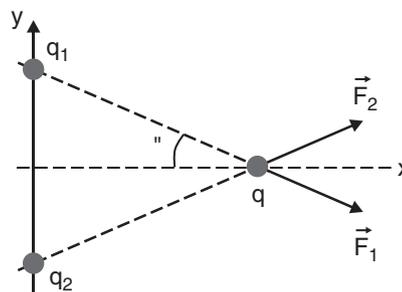
1. Dos pequeñas partículas con igual magnitud de carga y del mismo signo están separadas 20.0 cm entre sí. La fuerza de repulsión entre ellas es 0.240 N de magnitud. ¿Qué carga tiene cada esfera?

Solución:

2. ¿A qué distancia del núcleo se debe encontrar el electrón del átomo de hidrógeno para que la gravedad entre ellos sea igual al peso del electrón sobre la superficie de la Tierra?

Solución:

3. Dos partículas con cargas $q_1 = q_2 = 4.0 \mu\text{C}$ que están sobre el eje Y, en $y_1 = 0.250 \text{ m}$ y en $y_2 = -0.250 \text{ m}$, interaccionan con otra partícula $q = 5.0 \mu\text{C}$ colocada en $x = 0.400 \text{ m}$, $y = 0$. Determina la magnitud y dirección de la fuerza resultante sobre q .



Solución:

3.4 Procesos de electrización



Preguntas previas

¿Qué es la carga eléctrica? ¿Cuáles objetos poseen la carga positiva y cuáles la carga negativa? ¿Dónde se encuentran los primeros?



Actividad

Es probable que esta actividad la hayas realizado en años anteriores. Consiste en tomar un objeto de plástico (un peine, una pluma, una varilla), frotarlo vigorosamente contra el pelo o con una prenda de vestir preferentemente de lana o algodón, y acercarlo a trocitos de papel previamente recortados. Es evidente que el objeto de plástico atrae los papelitos. Lo mismo es posible con un globo que previamente llenaste con aire. Lo frota de igual manera y colocas la parte frotada contra una pared. El globo se quedará “pegado” a la pared.

Hasta el momento hemos hablado de objetos cargados que interaccionan y hemos visto cómo calcular la fuerza entre ellos. Sin embargo, queda pendiente la pregunta ¿de dónde les proviene la carga a tales objetos? El propósito de esta sección es dar respuesta a tal pregunta. De los experimentos de Franklin expuestos con anterioridad, parece evidente que la acción de frotar un objeto es la causa directa por la que en el cuerpo se pierde el balance entre electrones y protones; y, en consecuencia, queda cargado. Utilizaremos el término *electrizado* como sinónimo de *cargado eléctricamente*. De esta manera, inferimos que el primer proceso de electrización (o proceso de cargar eléctricamente) de un objeto es por frotamiento (fricción). Tal proceso, de acuerdo con la metáfora de Franklin, se da porque si frotamos un

objeto con otro (una varilla de plástico con un pañuelo de seda, por ejemplo) uno de los dos se lleva o arrastra electrones del otro, de la misma manera en que un borrador se lleva las partículas de gis de un pizarrón o las partículas de tinta de un pizarrón blanco. Así, el objeto que se lleva los electrones queda con carga negativa, y el que los pierde, con carga positiva.



Una consecuencia importante que también inferimos de este comportamiento es que la magnitud de la carga de los dos objetos es igual; en otras palabras, el número de electrones que pierde uno es igual al número de electrones que gana el otro. Este hecho conduce a enunciar el *principio de conservación de la carga*, el cual puede enunciarse de la siguiente manera: *En todo proceso de transferencia de carga eléctrica, la carga total permanece constante*. Tal enunciado es otra forma de decir que el número de electrones que pierde un objeto es igual al número de electrones que gana el otro objeto. En símbolos matemáticos, el principio de conservación de la carga se escribe de manera análoga al principio de conservación de la energía:

$$\Delta Q = 0$$

donde Q es la carga total involucrada en el proceso de electrización.

De este proceso de electrización se puede inferir un resultado más. Cuando decimos que un objeto queda cargado positiva o negativamente, lo que expresamos es que, de acuerdo con la discusión anterior, éste ha perdido o adquirido un cierto número de electrones. Así, la cantidad de carga adquirida siempre va a ser (en valor absoluto) un *múltiplo entero* de la *magnitud* de la carga del electrón. Este hecho describe una característica de la carga denominada cuantización.

En otras palabras, decimos que la carga está cuantizada porque existe una cantidad mínima de carga, la carga del electrón (en valor absoluto), y cualquiera otra cantidad de carga es un múltiplo entero de esa cantidad mínima. A la cantidad de carga mínima se le llama también el *cuanto (quantum)* de carga. En este caso la cantidad mínima de carga, o *cuanto* de carga, es e . La cuantización de la carga reside en el hecho de que en la naturaleza no hay fracciones de electrones, por lo que e , como propiedad, también se encuentra siempre con su valor total y no en fracciones.

Ejemplo

- En un aparato de Milikan para medir la carga del electrón, se encuentra que una gotita de aceite tiene una carga negativa de $2.083 \times 10^{-18} \text{ C}$. Determina el número de electrones en exceso que tiene la gota.

Solución:

De la relación $1e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, obtenemos el número de electrones que tiene la

$$\text{gota: } N_e = 2.083 \times 10^{-18} \text{ C} \left[\frac{1e}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}} \right] = 13e \text{ recuerda no hay fracciones de } e.$$



Problemas propuestos

7. Si la carga eléctrica está cuantizada, de manera análoga hay otras propiedades físicas que también lo están, por ejemplo, la energía. Si se usa este concepto podrías relacionar las siguientes columnas de cuantizaciones hipotéticas:

Es el cuanto de materia que posee todas sus propiedades físicas y químicas. Ladrillo

En el cuanto de los seres vivos que posee sus cualidades biológicas, físicas, químicas, de estructura, etcétera. Átomo

Si consideramos la construcción de un muro como hecho por unidades enteras. Célula

8. ¿Qué valor de carga negativa en coulombs hay en una cantidad de electrones igual al número de Avogadro?

Solución:

9. ¿Cuántos electrones es necesario que se transfieran de una moneda de cobre, inicialmente sin carga neta, para obtener una carga neta de $+4.0 \mu\text{C}$?

Solución:



Problemas complementarios

4. Una descarga eléctrica en el aire, como el rayo, transfiere cerca de 15 C entre la nube y el suelo. ¿Cuántos electrones se transfieren?

Solución:

5. Considera un anillo de plata de 18.000 g (con masa atómica $107.9 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ y número atómico 47). Calcula: a) ¿Cuántos protones hay en el anillo? b) ¿Cuál es su carga positiva total? c) Si su carga neta es cero, ¿cuántos electrones tiene? d) Si por fricción adquiriera una carga de -3.20 nC , ¿cuántos electrones tendría en exceso? e) ¿En qué proporción aumenta su carga respecto de la inicial?

Solución:

Para electrizar un cuerpo, además del proceso anterior, se tienen los procesos de *inducción* y *conducción*. Veamos los procesos en un ejemplo cotidiano. El experimento inicial nos muestra que, si frotamos (fricción) un objeto de plástico contra el cabello y lo acercamos, sin tocar, a los fragmentos pequeños de papel previamente preparados, el cuerpo que ha sido frotado los atrae de manera que se pegan a él. También es observable que, después de cierto tiempo —que puede ser al cabo de unos segundos—, los papelitos no sólo se desprenden del cuerpo y caen, sino que son expelidos con violencia (pequeña, por supuesto), como si una fuerza invisible los aventara desde el objeto.

Este experimento, contiene los tres procesos de electrización. Cuando el objeto se frota contra el cabello arrastra, literalmente, consigo electrones del otro, como cuando un borrador arrastra consigo las partículas de gis del pizarrón, para quedar con exceso de electrones, y en consecuencia, con carga negativa. El otro, al perder electrones, se queda con exceso de protones, por lo que queda con carga positiva. En esto consiste la electrización por fricción. La manera como se electrizan algunos materiales se presenta a continuación, donde la se-

cuencia significa que si se frota un material de la izquierda con uno de la derecha, queda cargado positivamente: piel de conejo-vidrio-mica-lana-piel de gato-seda-algodón-madera-ámbar-plásticos-hule natural-metales (cobre, níquel, cobalto, plata). De acuerdo con esto, ¿qué tipo de carga ha adquirido el objeto de plástico?



Al acercar el cuerpo cargado a los papelitos, los electrones de los papelitos sienten la fuerza que les aplica el cuerpo y se reacomodan. Como cargas con igual signo se repelen y las de distinto signo se atraen, los electrones de los papelitos tienden a moverse hacia la parte más alejada del cuerpo cargado, por lo que el papelito se divide en dos partes: una, la cercana al cuerpo, cargada con los núcleos (protones) “descubiertos”, y la parte alejada con exceso de electrones que cubren los núcleos. La primera tendrá una mayor carga positiva, y la segunda, una mayor parte negativa. Decimos que el papelito se ha *polarizado* y, entonces, ha adquirido *carga inducida*. Éste es el proceso de *inducción*; es decir, el cuerpo cargado hace que el otro cuerpo, eléctricamente neutro, se polarice al *inducir* cargas en él. Así, al electrizarse por inducción, la parte positiva es atraída por el cuerpo cargado negativamente y el papelito se mueve, vuela, hacia ese cuerpo y se le pega.

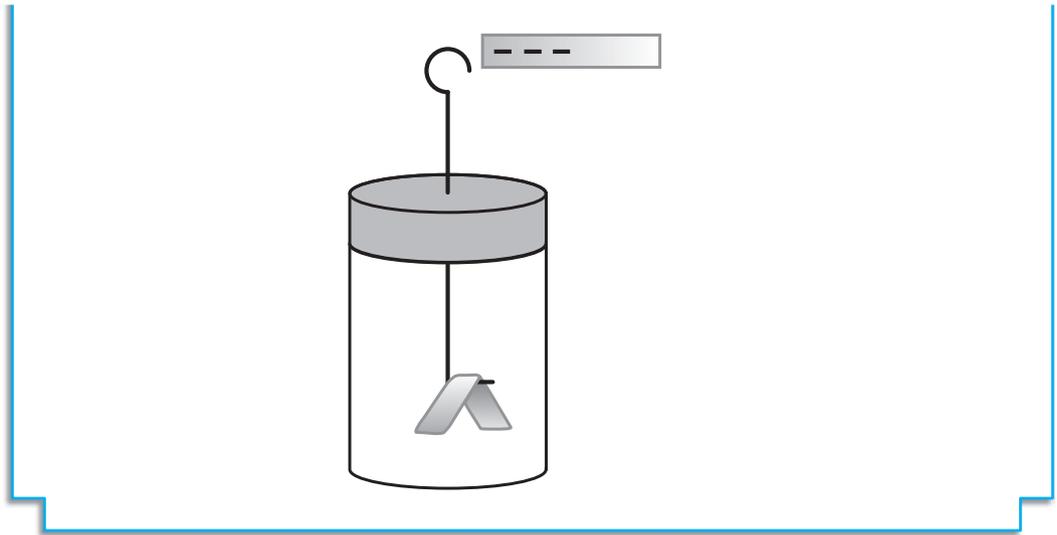
Al estar en contacto, comienza el proceso de *conducción*. Del cuerpo que tiene carga negativa fluyen los electrones hacia el otro cuerpo (los papelitos), hasta que las cargas en los dos objetos (cuerpo de plástico y papelitos) se equilibran —son numéricamente iguales— y luego se repelen entre sí, por lo que los papelitos salen despedidos. Para que haya conducción, los cuerpos deben estar en contacto físico, de manera que los electrones fluyan de un cuerpo a otro.



Actividad

Construcción de un electroscopio. *Un electroscopio es un dispositivo para observar como se ha cargado un objeto. Para construirlo se necesita un frasco de vidrio que pueda taparse y cerrarse herméticamente, y que su tapa se perfora fácilmente en su centro sin perder la hermeticidad. Por el agujero realizado en la tapa se hace pasar un alambre conductor grueso (o una varilla conductora), la cual previamente se ha doblado circularmente en el extremo que quedará afuera, y en el otro extremo se le ha doblado a 90° una porción pequeña (véase la siguiente figura).*

El extremo doblado a 90° va dentro del frasco. En este extremo se coloca una tira pequeña de papel aluminio doblada. Se cierra el frasco y tenemos un electroscopio. Para hacerlo funcionar, se toma una varilla de plástico y se frota como en la actividad con los papelitos y se acerca, sin tocar, al extremo exterior del conductor. ¿Qué sucede con la tira de papel aluminio? ¿Cómo explicar tal comportamiento?



Problemas propuestos

10. Para tener una idea aproximada de la relación entre las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional, regresemos al experimento inicial. Al frotar el globo con tu cabello, aquél adquiere una pequeñísima cantidad de carga. Si analizas el hecho de que el globo se queda pegado a la pared durante cierto tiempo, para las cantidades de masa y carga involucradas, ¿cuál fuerza, eléctrica o gravitacional, te parece más intensa? Explica tu respuesta.

11. Un electroscopio está cargado y sus hojas están separadas entre sí. Se le acerca, sin tocarlo, un objeto cargado previamente. Entonces, se observa que las láminas del electroscopio adquieren una separación menor. ¿Qué carga tiene el objeto, del mismo signo o diferente, de la carga de las láminas del electroscopio? ¿Se “perdió” carga del electroscopio?

-
-
- 12.** Las partículas A y B con carga eléctrica se atraen una a la otra. Las partículas B y C se repelen entre sí. Si se acercan A y C, entonces:
- a) Se atraen b) Se repelen
- 13.** Las partículas cargadas A y B se repelen una a la otra. Las partículas B y C también se repelen entre sí. Si se acercan A y C, entonces:
- a) Se atraen b) Se repelen
- 14.** Si un objeto de la sustancia A frota a otro de la sustancia B, A adquiere carga positiva, y B carga negativa. Pero si un objeto de la sustancia A se frota con otro de la sustancia C, A adquiere carga negativa. ¿Qué sucederá si un objeto de la sustancia B se frota con otro de la sustancia C?
- a) B y C adquieren carga positiva.
b) B adquiere carga positiva y C carga negativa.
c) B y C adquieren carga negativa.
d) B adquiere carga negativa y C carga positiva.
- 15.** Dos esferas idénticas, A y B, que tienen cargas de igual magnitud, se encuentran fijas y separadas por una distancia grande en comparación con su tamaño. Se repelen entre sí con una fuerza eléctrica de 100 mN. En seguida, una tercera esfera idéntica C, con una varilla aislante para sujetarla e inicialmente sin carga, hace contacto con la esfera A, luego con la esfera B y después se separa. Calcule la fuerza entre las esferas A y B.
-
-
-
-
-
- 16.** Las esferas pequeñas idénticas A, B y C, son conductoras y están aisladas. Inicialmente A y B tienen carga de $+3\mu\text{C}$; mientras que C tiene una carga de $-6\mu\text{C}$. Se permite que los objetos A y C se toquen y luego se separan. Después se deja que las esferas B y C se toquen y se separan.
- I. Si se acercan las esferas A y B, entonces:
- a) Se atraen b) Se repelen c) No tendrán efecto
- II. Si ahora se acercan las esferas, A y C entonces:
- a) Se atraen b) Se repelen c) No tendrán efecto
- 17.** Dos pequeñas esferas conductoras idénticas tienen carga neta de -2.10 nC y $+6.10\text{ nC}$. Calcula la fuerza eléctrica sobre cada una cuando están separadas 4.00 cm. Las dos esferas se ponen en contacto mediante un cable conductor

y en seguida se separa de ellas. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza eléctrica entre ellas después de hacer el contacto? ¿Es de atracción o de repulsión?

Solución:

3.5 El campo eléctrico



Preguntas previas

¿Cómo se define la intensidad del campo gravitacional? ¿De dónde se obtiene tal definición?

Regresemos nuevamente al caso gravitacional. La ley de gravitación universal, ecuación 3.1, da lugar a otra expresión más simple. La intensidad del campo gravitacional se define por la relación conocida:

$$g = G \frac{m'}{r^2}$$

con la cual la ecuación 3.1 se redujo a la expresión simple:

$$F_g = mg \quad (3.7)$$

Hay que hacer hincapié en que la ecuación 3.7 sigue siendo la ley de gravitación universal, sólo que escrita de otra manera; nada más cambió la notación. ¿No podríamos hacer algo semejante con la ley de Coulomb? Después de todo, hemos probado que ambas leyes son análogas y de la misma naturaleza. Claramente, por estas razones es posible definir la *intensidad del campo eléctrico* por la relación

$$E = k \frac{q'}{r^2} \quad (3.8)$$

con lo cual, la ley de Coulomb se escribe como

$$F_e = qE \quad (3.9)$$

Vectorialmente, las ecuaciones para las intensidades de los campos gravitacional y eléctrico se escriben de la siguiente manera:

$$\vec{g} = G \frac{m'}{r^2} \hat{r} \quad (3.10)$$

$$\vec{E} = k \frac{q'}{r^2} \hat{r} \quad (3.11)$$

donde \vec{g} y \vec{E} reciben los nombres de campo gravitacional y campo eléctrico, respectivamente.

Ahora bien, la definición de campo eléctrico, tal como se presenta en la ecuación 3.11, tiene una interpretación geométrica. Para llegar a ella, consideremos el origen de la ecuación 3.11: partimos de la ley de Coulomb, separamos la carga del cuerpo de prueba, q , y lo que queda es el campo eléctrico. Entonces, en la figura 3.3, esa acción corresponde a simplemente borrar el cuerpo de prueba, por lo que queda la situación de la figura 3.4. Con esto, ¿cuál sería ahora el significado matemático de la ecuación 3.8? Resulta que es la magnitud, es decir, la intensidad del campo eléctrico, calculada a la distancia r medida desde el origen del sistema de referencia (o el centro del objeto fuente). El vector \vec{r} es el vector de posición del punto donde se calcula esa magnitud. A tal punto se le conoce como *punto de campo*.

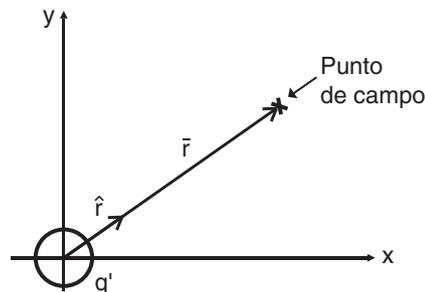


Figura 3.4

La constante k que aparece en las ecuaciones 3.6 y 3.8 y sus otras formas, se expresa en términos de una constante denominada *permisividad del vacío*, ϵ_0 , en la forma algebraica

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \text{ De momento, y para los propósitos de este curso, basta con saber que tal cons-}$$

tante se determina experimentalmente y tiene que ver con propiedades del espacio vacío, en cuanto a la transmisión de la luz.



Hasta el momento hemos discutido los aspectos formales del campo eléctrico, pero no hemos establecido un *concepto* de él. Para lograr tal finalidad, consideraremos, primero, lo que es un *campo*. Una primera aproximación a lo que es un campo la encontramos en el llamado campo de los números reales, el cual se conceptúa de la siguiente manera. Se tiene una recta dirigida, la conocida recta numérica. Ésta es, simplemente, una recta en la que a cada punto se le asocia un número, como se muestra en la figura 3.5.

Así, parte de la definición del campo de los números reales consiste en asociar, a cada punto de la recta, uno y sólo un número. De forma análoga, un campo vectorial (como el eléctrico y el gravitacional) es aquél donde a cada punto del espacio se le asocia uno y sólo un vector. Aquí comenzamos en un espacio que puede ser bidimensional o tridimensional. Como ejemplos de campos vectoriales bidimensionales tenemos los siguientes (figura 3.6).

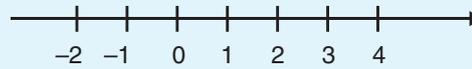


Figura 3.5 La recta numérica.

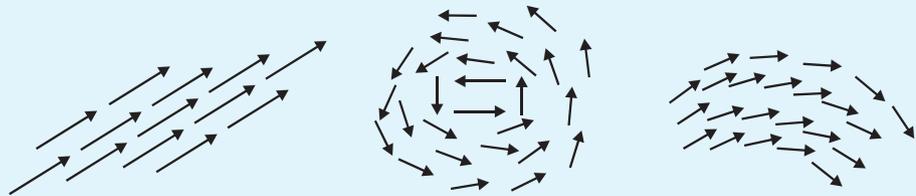


Figura 3.6 Tres campos vectoriales en dos dimensiones.

Si consideramos un objeto esférico con carga q , en el espacio que lo rodea tendremos un campo eléctrico (un campo vectorial eléctrico) que, de acuerdo con la simetría del caso dada por la ecuación 3.11, los vectores que representan el campo eléctrico, en cada punto de campo de la región, tienen dirección radial hacia fuera. En virtud de la dependencia inversa con el cuadrado de la distancia, la magnitud de cada vector se representa por el tamaño de la flecha cada vez más pequeña, conforme nos alejamos del objeto fuente. Entonces podemos pensar en varias imágenes para el campo eléctrico de un objeto esférico cargado: un alfilero, un erizo o un pez globo.

Por otro lado, es importante darse cuenta de que los vectores que representan el campo eléctrico se suman (se superponen), por lo que sobre una línea radial podemos representar todos los vectores sobre esa línea como un solo vector, por lo que obtenemos una imagen como la de la figura 3.7. Una línea de esa naturaleza recibe el nombre de *línea de fuerza*.

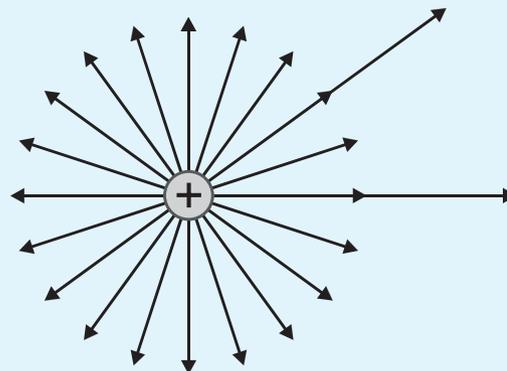


Figura 3.7 Líneas de fuerza en dos dimensiones para un cuerpo esférico con carga positiva.

Además, de la misma ecuación 3.11 vemos que, si el signo de la carga del objeto es positivo, no existe alteración algebraica y, por consiguiente, el campo eléctrico apunta radialmente hacia fuera. Pero si el signo de la carga del objeto es negativo, entonces aparece un signo menos en la ecuación, por lo que se invierte la dirección del campo eléctrico. Decimos, así, que los objetos con carga positiva se comportan como *fuentes*, y que los objetos con carga negativa se comportan como *sumideros*. En forma coloquial, afirmamos que las líneas de fuerza salen de los objetos con cargas positivas y entran a los objetos con cargas negativas.

Esto todavía tiene repercusiones más allá de lo discutido. Como la dirección de las líneas de fuerza para un cuerpo de simetría esférica es radial, resulta claro que tal dirección es perpendicular a la superficie en los puntos donde se originan. Por consiguiente, podemos extrapolar tal resultado diciendo que los vectores de campo eléctrico siempre son perpendiculares a la superficie del cuerpo cargado, lo cual apreciamos gráficamente en la figura 3.8.

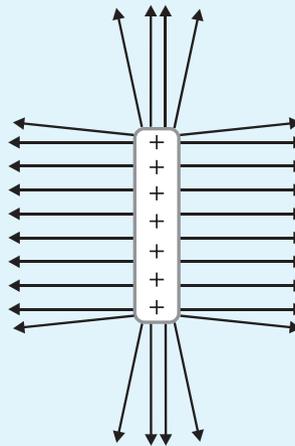


Figura 3.8

Ejemplo

- Una gotita de tinta en una impresora de inyección tiene una carga neta de $1.60 \times 10^{-10} \text{ C}$ y es atraída hacia el papel con una fuerza de $4.8 \times 10^{-4} \text{ N}$. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico asociado con esta fuerza?

Solución:

$$\text{De la relación } F = qE, \text{ resolvemos } E = \frac{F}{q} = \frac{4.8 \times 10^{-4}}{1.60 \times 10^{-10}} = 3.0 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Ejemplo

- Determina la magnitud y dirección del campo eléctrico creado por una pequeña esfera conductora con carga neta de $+15 \mu\text{C}$, a una distancia de 0.25 m de ella.

Solución:

Por tratarse de una carga positiva, la dirección del campo eléctrico es radial hacia

fuera de la esfera y su magnitud es: $E = k \frac{q'}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(15 \times 10^{-6})}{(0.25)^2} = 2.2 \times 10^6 \frac{N}{C}$

Ejemplo

- Una partícula de polvo de cemento con carga neta de $-3.1 \mu C$ experimenta una fuerza vertical hacia abajo de $6.2 \times 10^{-8} N$. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico donde se encuentra la partícula? b) Si se colocara una partícula cargada de $+10 \mu C$ en el mismo punto, ¿cuáles serían la magnitud y la dirección de la fuerza sobre esta partícula?

Solución:

a) La magnitud del campo es: $E = \frac{F}{q} = \frac{6.2 \times 10^{-8}}{3.1 \times 10^{-6}} = 2.0 \times 10^{-2} \frac{N}{C}$. b) Si se coloca la car-

ga positiva en el mismo punto, la fuerza será en dirección opuesta a la ejercida sobre la negativa, hacia arriba, y su magnitud es:

$$F = qE = (10 \times 10^{-6})(2.0 \times 10^{-2}) F = 2.0 \times 10^{-7} N.$$



Problemas propuestos

18. Si colocamos un objeto cargado dentro de una región del espacio donde exista un campo eléctrico, el objeto sentirá automáticamente la fuerza eléctrica inherente al campo y se acelerará. En términos del campo eléctrico, ¿en qué dirección se acelerará el cuerpo si su carga es positiva, en la misma dirección del campo o en dirección opuesta al campo? Explica.

19. ¿Cuál es la magnitud y dirección del campo eléctrico debido a una pequeña partícula cargada de $+5.0 nC$, a una distancia de $1.5 m$ de ella?

Solución:

20. Un electrón se encuentra en una región donde hay un campo eléctrico de $1.00 \times 10^4 \frac{N}{C}$. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza aplicada al electrón?

Solución:

21. En los puntos sobre su superficie, la Tierra crea un campo eléctrico de, aproximadamente, $140 \frac{N}{C}$ dirigido hacia su centro. ¿Qué fuerza eléctrica se ejercería sobre ti si tuvieras una carga de $-1.0 C$? Compara con tu peso actual en N.

Solución:

22. En un punto situado a 0.10 m de una esfera pequeña cargada, existe un campo eléctrico de magnitud $150 \frac{N}{C}$. ¿Cuál es la intensidad de campo eléctrico en un punto a 0.40 m de dicha esfera?

Solución:

23. El campo eléctrico a 0.45 m de una carga es $8.0 \times 10^5 \frac{N}{C}$ y dirigido hacia la carga. ¿Cuál es el valor de la carga? ¿Cuál es su signo?

Solución:



Problemas complementarios

6. En una cierta región del espacio hay un campo eléctrico que ejerce una fuerza de $3.00 \times 10^{-3} N$ sobre una partícula con carga de 12.0 nC. ¿Cuál es la carga de otra partícula colocada en la misma región, si se ejerce sobre ella una fuerza de $6.00 \times 10^{-2} N$?

Solución:

7. Dos pequeñas partículas con cargas $q_1 = 20.0 \mu C$ y $q_2 = 5.0 \mu C$ están separadas por una distancia de 3.00 m. Determina el punto sobre la línea que las une y en donde el campo eléctrico total es cero.

Solución:

8. Un cuerpo cargado A crea un campo eléctrico en un punto de $6.0 \frac{N}{C}$ hacia la derecha. Otro cuerpo cargado B crea en el mismo punto un campo eléctrico de $8.0 \frac{N}{C}$ hacia abajo. ¿Cuál es el campo eléctrico resultante debido a estos dos cuerpos en dicho punto en magnitud y dirección?

Solución:

3.6 Potencial electrostático



Preguntas previas

¿Cómo se conceptúa el trabajo? ¿Qué dicen los teoremas de trabajo y energía?
¿Qué es la energía?

Recordemos un par de conceptos de mecánica: trabajo y energía. Ambos conceptos están íntimamente ligados y no podemos hablar de uno sin recurrir al otro. En primer lugar, el concepto de trabajo, tal como se tiene en mecánica, es también aplicable a electrostática, por lo que los teoremas del trabajo y la energía también lo son. Por consiguiente, partamos de la expresión matemática que describe el trabajo, $W = Fd$, en el caso en que el ángulo entre la fuerza aplicada y la dirección del movimiento es cero. La situación a analizar, en analogía con el caso gravitacional, es el de un objeto que tiene carga negativa como objeto/carga fuente, y un objeto de prueba con carga positiva.

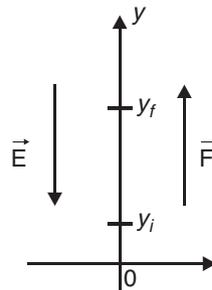


Figura 3.9

Siguiendo el razonamiento utilizado para el caso gravitacional, consideramos que la intensidad del campo eléctrico es constante y tomamos el sistema de referencia de la figura 3.9,

donde $\vec{F} = -qE\hat{j}$. Entonces, para mover el cuerpo de prueba desde una posición inicial y_i hasta una posición final y_f , con rapidez constante, debemos aplicar la fuerza de Coulomb, $\vec{F} = -qE\hat{j}$. Sustituyendo en la expresión anterior para el trabajo, tenemos lo siguiente:

$$W = qEd = qE(y_f - y_i)$$

de donde:

$$W = qEy_f - qEy_i$$

Análogamente a como se procede en mecánica, vemos que el trabajo realizado sobre un objeto que tiene carga q para moverlo, desde una posición inicial y_i hasta una posición final y_f , es igual al cambio en la cantidad qEy . Esto es, obtenemos el teorema del trabajo y la energía potencial eléctrica, así la cantidad qEy se denomina energía potencial eléctrica y el teorema se interpreta de la misma manera que los teoremas del trabajo y la energía en mecánica: cuando un agente realiza trabajo sobre un objeto, el efecto es cambiar su energía; en este caso, su energía potencial eléctrica. Si utilizamos el símbolo U_p para la energía potencial eléctrica o simplemente, energía eléctrica, de manera que $U_p = qEy$, el teorema anterior se escribe como:

$$W = \Delta U_p.$$

Las unidades de energía eléctrica son, evidentemente, joules.

Consideremos, ahora que el objeto fuente tiene carga q' positiva (figura 3.10a). Si se coloca un cuerpo de prueba con carga q positiva en una posición x_i con respecto al sistema de referencia, la interacción entre ambos objetos cargados será tal, que la fuerza eléctrica aplicada a la carga de prueba hará que el objeto se aleje siguiendo una línea de fuerza. Un tiempo después, este cuerpo se localiza en una posición x_f . En tales condiciones, su energía eléctrica cambiará de acuerdo con la discusión anterior.

Supongamos que al llegar a la posición x_f , por algún mecanismo hacemos que el objeto con la carga de prueba regrese a su posición original (figura 3.10b). Su energía eléctrica cambia nuevamente. ¿En cuál de los dos casos aumenta la energía eléctrica del objeto con carga de prueba?

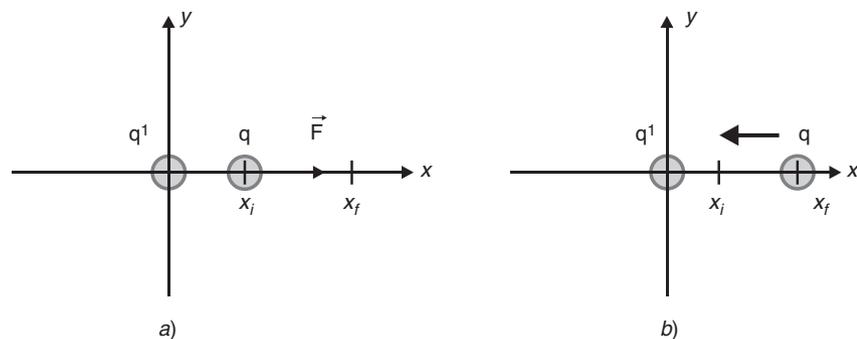


Figura 3.10

En los dos casos anteriores, la dirección de la fuerza aplicada es la misma que la dirección del movimiento, por lo que podríamos afirmar que, en ambos casos, el trabajo realizado es positivo y, en consecuencia, en ambos casos la energía eléctrica aumenta. Pero esto no puede ser así. Hace falta considerar la dirección del campo eléctrico y la fuerza aplicada generada en él sobre la carga de prueba. En el segundo caso, la fuerza debe ser aplicada por un agente externo, por lo que su energía potencial eléctrica aumenta; mientras que en el primer caso, su energía potencial disminuye. Tenemos entonces las siguientes relaciones con referencia a la figura 3.10b:

Cuando el objeto es repelido, tenemos que $x_f > x_i$, por lo que el cambio en la energía potencial eléctrica, $qEx_f - qEx_i$ es positivo, lo cual indica un aumento en la energía potencial eléctrica. En el segundo caso, se empuja al objeto desde una posición inicial mayor que la posición final, por lo que el cambio de energía potencial eléctrica es negativo, lo que indicaría una disminución de la energía potencial eléctrica. Ambos resultados se contraponen a la situación física en la que se obtiene el resultado opuesto. De aquí surge la convención de signo para el teorema del trabajo y la energía potencial eléctrica, que se expresa como:

$$W = -\Delta U_p \quad (3.12)$$

A partir de este momento emplearemos siempre esta expresión.

Hasta aquí los procedimientos se ejecutan de la misma manera que en mecánica, a excepción de la convención del signo; sin embargo, a partir de este punto haremos algo no hecho antes. Esto no quiere decir que no se pueda hacer en mecánica, sino que simplemente allá no lo hicimos. El proceso nuevo consiste en dividir el trabajo realizado entre el valor de la carga del objeto sobre el que se realiza tal trabajo:

$$\frac{W}{q} = -\Delta U_p = Ex_f - Ex_i$$

donde el cociente $\frac{W}{q}$ tiene unidades de joule sobre coulomb, y se interpreta de la siguiente manera: cuánto trabajo en joules se realiza para mover un objeto con carga q unitaria (1 C), desde una posición x_i hasta una posición x_f dentro de un campo eléctrico cuya intensidad es E . Esto es, tal cociente nos muestra la cantidad de trabajo necesaria a realizar por cada coulomb de carga que se mueva dentro de un campo eléctrico desde una posición inicial hasta una posición final.

El cociente así definido recibe el nombre de *diferencia de potencial*, de manera que la cantidad Ex_f será *el potencial* en el punto x_f , y la cantidad Ex_i será *el potencial* en el punto x_i . Usaremos el símbolo ΔV para la diferencia de potencial; esto es, $\Delta V = \frac{W}{q}$.

Las unidades de diferencia de potencial, joule sobre coulomb, $\frac{J}{C}$, reciben el nombre especial de *volt*, cuyo símbolo es V.

Por sus unidades, a la diferencia de potencial se le llama, también, *voltaje*, y otro nombre de uso común es *tensión*. Entonces, cuando escuchamos la expresión "cable de alta tensión", lo que debemos entender es que se refiere a un cable en

el que entre dos puntos (los equivalentes a x_i y x_f), el valor de la diferencia de potencial es muy grande.

De la definición dada anteriormente para el potencial eléctrico, puede demostrarse que el potencial eléctrico, para un objeto cargado de simetría esférica, tiene la siguiente expresión matemática:

$$V = k \frac{q'}{x}$$

donde x es la distancia medida desde el origen del sistema de referencia centrado en el objeto con carga q' ; esto es, la posición donde se encontraría el otro objeto cargado. Con esta expresión, inferimos valores y características de los potenciales en puntos del espacio, de acuerdo con las características de q' y el valor de x .

Ejemplo

- La diferencia de potencial entre una nube de tormenta y el suelo puede llegar a ser de 90 millones de volts. Si se produce una descarga eléctrica (rayo) entre el suelo y la nube, en la que transfieren 2.1 C de carga, ¿cuál será el cambio en la energía potencial de las partículas portadoras de carga?

Solución:

Calculamos ΔU_p a partir de la relación $W = -\Delta U_p$ sustituyendo en $\Delta V = \frac{W}{q} = \frac{-\Delta U_p}{q}$, de donde $\Delta U_p = -q\Delta V = -(2.1)(90 \times 10^6) = -1.9 \times 10^8$ J.

Ejemplo

- Calcula la diferencia de potencial entre dos puntos, cuando en un campo eléctrico se requieren de 10.0 J para mover un objeto, cuya carga es de 0.02 C entre esos dos puntos.

Solución:

Al mover la carga entre dos posiciones en un campo eléctrico cambia su energía potencial eléctrica que, en este caso, es de 10.0 J. Por lo tanto, la diferencia de potencial es:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_p}{q} = \frac{10.0}{0.02} = 500 \text{ V}$$

Ejemplo

- Determina el potencial eléctrico de un punto a 1.3 m de una pequeña esfera conductora con carga de 4.5×10^{-8} C.

Solución:

Para el potencial eléctrico debido a una carga a una distancia x , tenemos:

$$V = k \frac{q'}{x} = 9 \times 10^9 \frac{4.5 \times 10^{-8}}{1.3} = 312 \text{ V}$$



Problemas propuestos

- 24.** El trabajo realizado para mover una partícula cargada con $2.5 \times 10^{-6} \text{ C}$ de un punto A a otro punto B, es de $5.0 \times 10^{-5} \text{ J}$. a) ¿Cuál es la diferencia de energía potencial eléctrica entre los dos puntos? b) ¿Y su voltaje?

Solución:

- 25.** El ánodo o terminal positiva de un tubo de rayos X está a un potencial de 20,000 V por arriba del cátodo o terminal negativa. ¿Qué trabajo se realizará sobre un electrón al moverlo entre esas terminales?

Solución:

- 26.** Una carga de $3.0 \times 10^{-5} \text{ C}$ se mueve entre dos puntos, cuya diferencia potencial es de 25.0 V a) ¿Qué trabajo se realiza sobre la carga? b) ¿Cuál es el cambio de energía potencial eléctrica?

Solución:

27. Un protón se desplaza en línea recta a lo largo de una distancia de 0.500 m, dentro de un campo eléctrico de magnitud $1.50 \times 10^6 \frac{V}{m}$. a) Determina la fuerza aplicada al protón. b) ¿Qué trabajo se realiza sobre él? c) ¿Cuál es el cambio en su energía potencial eléctrica? d) ¿Cuál es el voltaje?

Solución:

28. Considera el problema resuelto para el átomo de hidrógeno (secc. 3.3). Para este modelo, ¿cuál es el potencial eléctrico debido al núcleo, a la distancia del radio de la órbita del electrón?

Solución:

29. ¿Cuál es el valor del potencial eléctrico debido a una pequeña partícula cargada de $5.00 \mu C$, a 0.400 m de ella?

Solución:

30. El potencial eléctrico a cierta distancia de una partícula esférica cargada con 12.0 nC es de 1800 V. ¿Cuál es esta distancia?

Solución:

3.7 Diferencia de potencial y campo eléctrico



De la expresión para la diferencia de potencial, encontramos la expresión $\Delta V = Ed$. Basándonos en esta ecuación aseguramos que, en la región del espacio entre los puntos donde hay una diferencia de potencial, existe un campo eléctrico, cuya intensidad es $E = \frac{\Delta V}{d}$. De aquí que las unidades de intensidad del campo eléctrico también son volt sobre metro, es decir, cuántos volts hay por cada metro.

Así, si logramos producir una diferencia de potencial entre dos puntos del espacio, tendremos un campo eléctrico entre esos puntos. Lograrlo es muy sencillo, ya que existen dispositivos que son *fuentes* de diferencia de potencial: las pilas. Toda pila tiene sus dos puntos, positivo y negativo, así como valores de diferencia de potencial específico. Por ejemplo, las más comúnmente usadas, las del tipo AA, tienen un voltaje de 1.5 V, lo cual significa que, entre sus extremos hay una diferencia de potencial de 1.5 V. (¿Cuál es el valor de la intensidad del campo eléctrico dentro de la pila?)

Ejemplo

- **Un acumulador.** ¿Cómo funciona un acumulador convencional, de los que encontramos en todos los automóviles? Sabemos que la diferencia de potencial entre sus extremos es de 12 V. Para que esto ocurra, las cargas dentro de él deben separarse, lo que implica fuerzas tanto de origen químico como eléctrico. Los portadores de carga emigran hacia la terminal positiva o hacia la terminal negativa, dependiendo de si su carga es negativa o positiva, respectivamente. Al acumularse los portadores, por ejemplo, de signo positivo, se va incrementando la interacción eléctrica entre éstos y los demás que van acercándose a la terminal.

Entonces, aparecen fuerzas de repulsión que impiden que continúe la acumulación de carga. Sin embargo, las fuerzas de origen químico impulsan a los portadores en contra de las fuerzas eléctricas. Este proceso se mantiene hasta que la cantidad de carga acumulada es tal, que la interacción eléctrica de repulsión contrarresta las fuerzas de origen químico para llegar a un equilibrio. La afirmación de que existe una diferencia de potencial de 12 V entre las terminales significa que, para cada coulomb de carga, las fuerzas de origen químico están relacionadas con un trabajo de 12 J en contra de las fuerzas eléctricas.

Ejemplo

- Entre las superficies interna y externa de una pared o membrana celular, debido a las cargas presentes en ellas, hay una diferencia de potencial de 90 mV. Si su espesor es 7.0×10^{-9} m, ¿cuál será la magnitud del campo eléctrico en la membrana celular?

Solución:

Entonces, $E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{90 \times 10^{-3}}{7.0 \times 10^{-9}} = 1.3 \times 10^7 \frac{N}{C}$. La presencia de este campo facilita el paso de moléculas cargadas a través de la membrana.



Problemas propuestos

31. Demuestra que las unidades de volt sobre metro son iguales a newton sobre coulomb.

Solución:

32. En los motores de combustión interna, la chispa eléctrica o descarga que enciende la mezcla de aire-combustible es producida por las puntas terminales

de las bujías. Éstas tienen una separación de 1.10 mm. Si se requiere un valor de campo eléctrico de $3.0 \times 10^6 \frac{V}{m}$ para que se produzca la descarga, ¿qué voltaje es necesario aplicar a la bujía?

Solución:

- 33.** En más de una ocasión has tenido descargas eléctricas al tocar personas u objetos. Supón que se produce una descarga entre tu mano y la manija de una puerta del automóvil en el instante en que se encuentran separadas a una distancia de 3.00 mm. Si para ionizar el aire se requiere de una intensidad de campo eléctrico de $3.0 \times 10^6 \frac{V}{m}$, ¿cuál será la diferencia de potencial entre tu mano y la manija?

Solución:



Problemas complementarios

- 9.** La energía que disipa un pararrayos es enorme. Para darte una idea, considera uno que permite un paso de carga de 25.0 C a través de una diferencia de potencial de 1.0×10^8 V, ¿cuánta energía disipa en la descarga?

Solución:

10. Durante una tormenta una descarga eléctrica puede alcanzar desde 150 m hasta cerca de 3 km de longitud. Si el campo eléctrico máximo que soporta el aire es $3.0 \times 10^6 \frac{V}{m}$ y usamos este valor como cierto en condiciones de tormenta, ¿qué diferencia de potencial se requirió para la descarga a 150 m? ¿Y a 3 km?

Solución:

11. Se desea acelerar un electrón desde $3.50 \times 10^6 \frac{m}{s}$ hasta $8.50 \times 10^6 \frac{m}{s}$. ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de la que debe hacerse pasar?

Solución:

3.8 La corriente eléctrica



Preguntas previas

¿Qué es un gas? ¿Cómo se encuentran las moléculas que componen un gas?

Entre la gran variedad de materiales que hay en la naturaleza, una clase de ellos tiene importancia para el tema que estamos estudiando: los conductores. Al pensar en un conductor, lo más probable es que la primera imagen que llega a tu mente es la de metales y, en particular, el cobre. Esos materiales tienen peculiaridades en su estructura atómica y molecular que los hacen poseer la propiedad que los caracteriza como conductores. Para entender tal

peculiaridad describiremos el llamado *modelo de gas de electrones* para un conductor sólido, particularmente metales. Tal modelo fue desarrollado por Albert Einstein para su explicación del efecto fotoeléctrico.

Consideremos un átomo individual de un metal, por ejemplo, cobre. Estructuralmente, cada átomo de cobre tiene dos electrones, aquellos que en química se denominan electrones de valencia, cuya característica es que son los de menor energía de enlace al núcleo. Cuando se comienzan a agregar átomos de cobre para formar una muestra macroscópica, cada átomo contribuye con sus dos electrones de valencia a la estructura molecular. Los electrones, tanto como los núcleos, son indistinguibles; esto es, todos son “idénticos”, pues no hay manera de “distinguirlos” entre ellos.

Así, por su proximidad en la estructura molecular, los electrones de valencia “pierden” la noción acerca de con quién llegaron, y entonces su movimiento ya no será en las inmediaciones de su átomo original, sino que se moverán a través de toda la estructura molecular, de un modo semejante a como se mueven las partículas de un gas confinado en un contenedor, es decir, en todas direcciones con un amplio intervalo de valores de rapidez. Los electrones, entonces, forman una especie de “nube” (o “gas”), dentro de la cual se encuentran inmersos los núcleos junto con el resto de los electrones de su estructura. En este contexto, a los electrones del gas, originalmente llamados de valencia, los denominaremos *electrones deslocalizados*.



Ahora, supongamos que podemos generar un campo eléctrico dentro del metal; entonces, los electrones deslocalizados “sienten” la fuerza $F = eE$, donde e es la carga del electrón, y serán acelerados en dirección opuesta al campo eléctrico. Entonces, en promedio, los electrones deslocalizados se mueven en una sola dirección con lo que decimos que se ha establecido una *corriente eléctrica*, para la que utilizaremos como símbolo la letra i . En una primera aproximación, en un metal definimos la corriente eléctrica –o simplemente corriente– como un *flujo unidireccional de electrones*.

Cuantitativamente, para una muestra macroscópica, la corriente se define como la cantidad de carga que atraviesa una superficie (generalmente hipotética) perpendicularmente, por unidad de tiempo. Esto es:

$$i = \frac{q}{t}$$

Esta ecuación está restringida para el caso en que, además de tenerse una muestra macroscópica, la corriente es estacionaria; esto es, el flujo de carga a través de la superficie es constante. De esta definición se encuentran las unidades de i : coulomb sobre segundo, que es una combinación que recibe el nombre de ampére, cuyo símbolo es A.

Ejemplo

- ¿Qué corriente eléctrica circula a través de un conductor por el que pasan 12 C de carga en 4.0 s?

Solución:

De la relación anterior: $i = \frac{q}{t} = \frac{12}{4.0} = 3.0 \text{ A}$

Ejemplo

- ¿Cuánta carga pasa a través de un motor de arranque de un automóvil, si durante el lapso de 4.0 s al arrancar el motor, el amperímetro marca una corriente de 220 A?

Solución:

Despejamos la carga q que circula por el motor de arranque:

$$q = it = (220)(4.0) = 880 \text{ C.}$$



Problemas propuestos

- 34.** Una corriente eléctrica fluye de un cuerpo a otro. ¿Cómo es el potencial eléctrico de uno respecto del otro?
a) Tienen el mismo potencial.
b) El potencial de uno es mayor que el otro.
- 35.** ¿Qué corriente circula por el filamento de un foco, si en un lapso de 25.0 s la carga que pasa es de 20.0 C?

Solución:

- 36.** ¿Cuántos electrones por segundo pasan a través del filamento de un foco por el que en forma continua circulan 0.60 A?

Solución:

- 37.** Una tostadora eléctrica requiere de 900.0 C de carga durante un lapso de 1.50 min, para dorar dos rebanadas de pan. ¿Qué corriente circula por la tostadora al usarla?

Solución:

- 38.** Una persona adquiere, por fricción, un exceso de carga de 1.25×10^{10} electrones, y al tocar una puerta conductora se descarga completamente en 0.250 s. Calcula la corriente en el proceso de descarga.

Solución:

- 39.** ¿Cuánta carga es transferida por una corriente de 0.50 A en 15.0 min?

Solución:

Entre físicos, ingenieros y técnicos existe la convención de considerar que en un conductor metálico la corriente es un flujo neto de carga positiva, que surge de la rapidez de arrastre de los electrones y *no* del movimiento mismo de los electrones. La convención aceptada es que la dirección de la corriente va de la terminal positiva a la terminal negativa en una pila o acumulador, a pesar de que en el caso especial de los metales sólo se muevan los electrones. Sin embargo, los circuitos no solamente consisten de alambres conductores, ya que encontramos corrientes en soluciones electrolíticas, como ya hemos discutido, en gases y en plasmas, y a través de semiconductores.

En todas estas corrientes se observa que el movimiento es lo mismo para iones positivos que negativos; nada induce a pensar que la corriente eléctrica es debida solamente al movimiento de portadores de carga negativa, excepto en el caso de conductores metálicos.

Por consiguiente, la convención es que la corriente tiene que referirse al flujo de carga positiva, como se acaba de mencionar anteriormente. Por supuesto, que esto no representa ninguna ley de la naturaleza, sino tan sólo un asunto de conveniencia, por lo que es costumbre referirse a ello como la *dirección convencional* o *sentido convencional* de la corriente eléctrica.

De acuerdo con este análisis, hablamos de un “punto de potencial alto” cuando observamos acumulación de carga positiva; y de un punto de “potencial bajo”, cuando observamos acumulación de carga negativa. Esto concuerda con nuestra definición de diferencia de potencial en términos de cargas que se mueven: se requiere realizar trabajo para mover un objeto con carga positiva hacia un punto de potencial alto, en contra de las fuerzas eléctricas que aplican los objetos con carga positiva que ya se encuentran ahí.

Por otro lado, regresando al caso de las pilas (ejemplo de la sección 3.7), la esencia de su funcionamiento consiste en “transformar” la energía química en energía eléctrica. Las pilas se denominan *fuentes de fem* porque “transforman” energía no eléctrica en energía eléctrica. La denominación *fem* se refiere a un término ya obsoleto, pero que seguimos utilizando: *fuerza electromotriz*. Actualmente es bien sabido que tal cantidad no es una fuerza en el sentido en que ésta se ha definido por medio de la leyes de Newton. Por tal motivo, cuando tengamos que utilizar el término lo haremos solamente con las siglas *fem*. El símbolo convencional para la fem es ϵ , y sus unidades son joules sobre coulomb o volt. Por consiguiente, si un coulomb de carga que pasa a través de una pila gana 6 joules de energía eléctrica, la fem de la pila será de 6 V.

3.9 Resistencia eléctrica



Preguntas previas

¿Qué es la fricción? ¿Cómo se manifiesta un aumento de temperatura de un cuerpo respecto de sus átomos o moléculas?



Actividad

Analogía entre flujo y corriente. *Entre el flujo de un fluido, especialmente un líquido, a través de una tubería y la corriente eléctrica se pueden establecer varias analogías. La primera es la que existe entre el movimiento de los electrones y del líquido. La segunda tiene que ver con la diferencia de potencial. ¿Cuál es el análogo de la diferencia de potencial en el flujo de un líquido a través de una tubería? ¿Cómo es más fácil que se fluya un líquido, a través de un tubo de diámetro pequeño o a través de un tubo de diámetro mayor, suponiendo las mismas condiciones de presión y viscosidad? ¿Y a través de una tubería muy larga o a través de una más corta? ¿Cuál sería la analogía para estas dos últimas situaciones?²*

² Al final de esta sección encontraremos las respuestas a todas las preguntas.

En cuanto a la corriente tenemos una complicación, ya que el flujo de electrones en un conductor metálico no es tan simple como pareciera. Recordemos que la estructura metálica está conformada por átomos con sus electrones ligados, por lo que cuando los electrones de valencia comienzan su movimiento bajo la influencia del campo eléctrico, chocarán contra estos átomos y contra otros electrones, realizando un movimiento con varias desviaciones, (figura 3.11); pero que, en promedio, es en una sola dirección. Como consecuencia de esos choques se produce una “fricción” dentro del conductor, razón por la cual todos los conductores se calientan —se eleva su temperatura— con el paso de la corriente. Estos choques contribuyen a una característica eléctrica de todos los materiales, la *resistencia*, la cual se define como la oposición que presentan los materiales al paso de la corriente.

Todos los materiales en la naturaleza tienen resistencia; así, conductores son aquellos materiales que tienen valores de resistencia relativamente pequeños; mientras que aislantes son aquellos que tienen valores de resistencia altos. La energía térmica producida por la fricción al paso de la corriente se disipa en el medio que rodea al conductor; esto es, la resistencia siempre consume energía. Las unidades de resistencia son los ohms, cuyo símbolo es la letra omega mayúscula: Ω . Para representar la resistencia, utilizaremos la letra R .

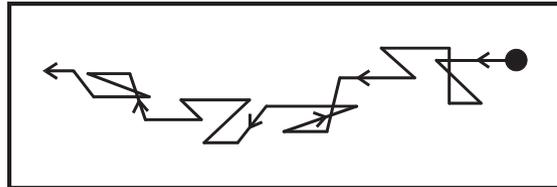


Figura 3.11 Representación esquemática de la trayectoria de un electrón dentro de un conductor en una corriente eléctrica.

Para un conductor sólido, la resistencia depende de varios factores. Supongamos dos alambres, por ejemplo de cobre, del mismo diámetro pero uno más largo que el otro. ¿Cuál de los dos ofrecería mayor resistencia al paso de la corriente? Por supuesto que el más largo. Ahora, consideremos otros dos alambres de cobre de la misma longitud; pero uno de mayor diámetro que el otro. Ahora, ¿cuál de los dos ofrecerá mayor resistencia al paso de la corriente? Es claro que el de menor diámetro. Entonces, inferimos que la resistencia de un conductor sólido es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su diámetro:

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

donde l es la longitud del conductor, A su área de sección transversal, y ρ una constante de proporcionalidad denominada *resistividad*.



De las discusiones anteriores, concluimos que la resistencia depende de factores macroscópicos y microscópicos. Los primeros son la longitud y el área de sección transversal; mientras que los segundos tienen que ver con el tipo de átomo o molécula y, por el modelo de gas de electrones, con la temperatura. Tales factores

microscópicos están contenidos en la resistividad. Esta cantidad es un parámetro característico de cada material, por lo que para conductores con dimensiones iguales, sus resistencias dependen únicamente de sus resistividades. Un conductor es aquel que tiene resistividad relativamente pequeña; en tanto que un aislante es aquel que tiene resistividad relativamente grande. Experimentalmente se comprueba que la resistividad es directamente proporcional a la temperatura. A continuación resumimos algunos valores de resistividad.

Resistividades aproximadas a 0° C	
Material	$\rho(\Omega m)$
Cobre	1.54×10^{-8}
Oro	2.27×10^{-8}
Mercurio	94×10^{-8}
Madera (maple)	3×10^8
ámbar	5×10^{14}

Ejemplo

- La resistencia de calentamiento de una estufa eléctrica es un alambre de 1.15 m y un área de sección transversal de $3.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Si el material tiene resistividad de $6.80 \times 10^{-5} \Omega m^2$, ¿cuál será su resistencia?

Solución:

$$\text{Sustituyendo } R = \rho \frac{l}{A} = 6.80 \times 10^{-5} \frac{1.15}{3.15 \times 10^{-6}} = 24.8 \Omega.$$

Ejemplo

- Un alambre conductor de resistencia 20.0Ω se funde y con ese mismo material se elabora otro alambre cuatro veces más largo y de la mitad del área transversal que el inicial. ¿Cuál es la resistencia de este nuevo alambre?

Solución:

Designemos como R_0 la resistencia antes de fundir y R_f después de fundir;

Además, $l_f = 4l_0$; $A_0 = \frac{1}{2}A_f$, entonces: $R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0} = 20.0 \Omega$ y sustituyendo para R_f ,

$$R_f = \rho \frac{l_f}{A_f} = \rho \frac{4l_0}{\frac{1}{2}A_f} = 8\rho \frac{l_0}{A_0} = 8R_0 = 8(20.0) = 160 \Omega.$$

Ejemplo

- Los cables conductores son catalogados por calibres y tipo de material. Uno bastante común de uso doméstico es el calibre 14 de cobre que, de acuerdo con datos de tablas, tiene un área transversal de $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. ¿Qué resistencia tendrá una extensión de 30.0 m totales de ida y retorno de este calibre?

Solución:

Usando la resistividad del cobre: $R = \rho \frac{l}{A} = 1.54 \times 10^{-8} \frac{30.0}{2.08 \times 10^{-6}} = 0.222 \Omega$.



Problemas propuestos

40. El filamento de un foco permite mayor paso de corriente si es...
- a) más delgado b) más grueso c) no hay efecto en la corriente
41. ¿En qué factor se modifica la resistencia de un cable conductor, si se duplica su radio?
- a) 2 b) $\frac{1}{2}$ c) 4 d) $\frac{1}{4}$
42. Las líneas de alta tensión para suministro de energía a las ciudades son de cobre. ¿Qué resistencia tendrá un cable de 2.0 cm de diámetro y 100.0 km de longitud?

Solución:

43. Un conductor de cobre y otro de oro tienen la misma longitud y resistencia. ¿Cuál será la razón de sus diámetros?

Solución:

44. Algunas resistencias de los chips de circuitos integrados se construyen de oro por las dimensiones del circuito. Si se usa una sección transversal rectangular de $1.5 \times 15.0 \mu\text{m}$ y longitud de $450 \mu\text{m}$ en el diseño de una resistencia de este tipo, ¿cuál sería su valor en ohms?

Solución:



Problemas complementarios

12. Un pájaro, para el que sus patas están separadas por 5 cm, se encuentra parado en un cable del alumbrado público que transporta 1 000 A. Si la resistencia del cable es $50 \times 10^{-6} \frac{\Omega}{m}$, ¿cuál será la resistencia del cable entre las patas del pájaro?

Solución:

13. Las líneas de alta tensión en ocasiones son de aluminio; el cable utilizado para estas líneas tiene un radio de 1.25 cm. ¿Qué resistencia tienen 10.0 km de este cable? (Para el aluminio, $\rho = 2.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)

Solución:

14. Si un cubo de aluminio tiene 2.0 m de arista, ¿cuál será la resistencia entre dos caras opuestas?

Solución:

Respuestas a las preguntas de la actividad inicial

La analogía para ΔV es Δp , las diferencias de presión. A veces a la presión se le llama potencial hidrodinámico. El flujo es claramente más fácil a través de una tubería de mayor diámetro y menor longitud; la analogía aquí es la resistencia con todos sus parámetros, excepto la resistividad.

3.10 Disipación de energía en una resistencia



Preguntas previas

¿Qué es el calor? ¿Qué tipo de energía está involucrada en el calor?

Cuando los electrones se mueven a través del conductor, el campo eléctrico actúa como el agente que realiza trabajo para moverlos. De esta manera, los electrones adquieren energía cinética. Por virtud de los choques contra átomos de la red metálica y contra otros electrones, gran parte de esa energía se transfiere a los átomos y/o a los otros electrones, con el consiguiente aumento de temperatura. Esto nos habla de una diferencia fundamental entre la forma en que se utiliza la energía en un motor y en un foco de filamento.

El proceso de transferencia de energía en un motor es, eléctricamente hablando, reversible; esto es, la corriente eléctrica proporciona energía al motor, de manera que éste sea capaz de realizar trabajo, por ejemplo, al hacer girar una flecha. Y también puede convertirse en un generador de corriente eléctrica si se hace girar por algún otro medio mecánico. Por otro lado, un foco de filamento no es reversible. La mayoría de la energía eléctrica se disipa en el medio ambiente en forma de calor, y no es posible generar corriente eléctrica calentando el filamento conductor. El motor puede ser una fuente de fem; pero un foco de filamento, no. Los conductores tales que disipan energía reciben el nombre de *resistores*.

Durante sus investigaciones del equivalente mecánico del calor, James Joule (1818-1889) estudió la producción de calor en resistores. Actualmente a este proceso se le llama *calor de*

Joule. Encontró, experimentalmente, que la rapidez de producción de energía térmica en un resistor metálico es proporcional al cuadrado del valor de la corriente. Como sabemos, la rapidez de producción o de consumo de energía, es, por los teoremas del trabajo y la energía, lo que hemos definido como la potencia, $P = \frac{W}{t}$. Los resultados experimentales de Joule se resumen en la expresión $P = \text{const.} \times i^2$, que se conoce como *ley de Joule*. La constante en esta expresión resulta ser la resistencia del resistor, de manera que, finalmente, la ley de Joule queda como:

$$P = i^2 R \quad (3.13)$$

La ley de Joule se infiere de evidencias experimentales y nos dice algo sobre el comportamiento de la materia; aunque no tiene la importancia conceptual de la ley de Coulomb o de las leyes de Newton. La ley de Joule sólo describe la proporcionalidad entre la corriente eléctrica y la disipación de energía en ciertos tipos de materiales, como los metales. Sin embargo, tiene gran importancia en la fundamentación de la teoría de circuitos como veremos en seguida.

Ejemplo

- Por dos focos de filamento incandescente circulan 0.833 A y 1.67 A, respectivamente; y se especifica que disipan 100 W y 200 W de potencia eléctrica, también respectivamente. ¿Cuál es la resistencia de cada uno?

Solución:

De la ley de Joule, despejamos la resistencia para cada foco:

$$R = \frac{P}{i^2} = \frac{100}{0.833^2} = 144\Omega \quad \text{y} \quad R = \frac{P}{i^2} = \frac{200}{1.67^2} = 71.7\Omega, \text{ respectivamente.}$$



Problemas propuestos

45. En los consumos domésticos de energía eléctrica, la CFE nos envía recibos, en los cuales las unidades que cobra son kilowatt-hora (kW-h). Exactamente, ¿a qué cantidad física corresponden estas unidades? Demuéstralo algebraicamente.

Solución:

- 46.** ¿Cómo funcionan, con base en el efecto Joule, los fusibles?
- 47.** ¿Cuál es el valor de la resistencia de un foco de filamento de 40 W que enciende con su brillantez máxima y con una corriente de $\frac{1}{3}$ A?

Solución:

- 48.** Calcula la energía consumida por tener encendido un foco de filamento de 100 W durante 30 minutos. Expresa el resultado en kW-h.

Solución:

- 49.** ¿Qué potencia disipa un tostador de pan que tiene una resistencia de 14.0 Ω que opera la línea doméstica de 120 V y requiere de 8.60 A?

Solución:

- 50.** Una plancha eléctrica tiene una resistencia de 10.0 Ω . ¿Cuánta energía térmica se produce en 10 minutos, si la corriente utilizada es de 10.0 A?

Solución:

51. ¿Cuál es la resistencia de un horno de microondas de 650.0 W, si para funcionar requiere de 5.1 A de corriente?

Solución:

3.11 La ley de Ohm



Preguntas previas

¿Qué es la diferencia de potencial? ¿Cuáles son sus unidades? ¿Qué es la corriente eléctrica? ¿Cuáles son sus unidades? ¿Qué es la resistencia eléctrica? ¿Cuáles son sus unidades?

En 1827, George Simon Ohm, un científico alemán, descubrió la ley que lleva su nombre. Consideremos un resistor AB (figura 3.12) con resistencia R , a través del cual circula una corriente i . Como fluyen portadores de carga a través del resistor y se produce calor, entonces estos portadores (electrones) pierden energía. En otras palabras, hay una diferencia de potencial entre las terminales del resistor; A tiene un potencial mayor que B. El cálculo de la diferencia de potencial requiere un poco de álgebra y algunas definiciones.

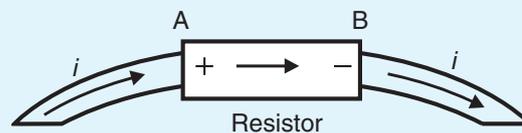


Figura 3.12

Dado que la diferencia de potencial es el trabajo realizado para mover una unidad de carga, $\Delta V = \frac{W}{q}$, y la carga en términos de la corriente es $q = it$, entonces $\Delta V = \frac{W}{it}$. Luego, la potencia, definida algebraicamente como $P = \frac{W}{t}$, nos lleva a

$\Delta V = \frac{P}{i}$. Finalmente, aplicando la ley de Joule a esta última expresión, llegamos a $\Delta V = iR$.

Esta última expresión nos lleva inmediatamente a la expresión de la ley que, en la actualidad, conocemos como *ley de Ohm*, la cual establece que la corriente en un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada al conductor, e inversamente proporcional a su resistencia; en símbolos:

$$i = \frac{\Delta V}{R}$$

Ejemplo

- Considera el problema resuelto anterior del alambre de calibre 14. ¿Qué corriente circularía a través de él, si se usa a un voltaje de 120.0 V?

Solución:

De la Ley de Ohm: $i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{120.0}{0.222} = 540 \text{ A}$, una corriente muy intensa que, en la práctica, produciría una gran cantidad de calor y destruiría el aislante si no se usa con una resistencia.

Ejemplo

- La resistencia de calentamiento de una secadora es de 12Ω y se conecta al voltaje doméstico de 120 V. ¿Qué corriente circula por el elemento calefactor?

Solución:

Sustituyendo, $i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{120}{12} = 10 \text{ A}$

Ejemplo

- ¿Qué resistencia eléctrica tiene el filamento de un foco por el que circulan 0.80 A, cuando se conecta a un voltaje de 120.0 V?

Solución:

Despejando, tenemos $R = \frac{\Delta V}{i} = \frac{120.0}{0.80} = 150 \Omega$



Problemas propuestos

52. Trata de hacer una analogía entre carga, corriente y resistencia, con automóviles y tráfico por una avenida. ¿Cuál sería el análogo para cada caso?

53. El cuerpo humano tiene una resistencia que varía de acuerdo con su humedad, desde 100Ω bien húmeda y con sales, hasta 500000Ω con un mínimo de humedad. Determina la corriente que pasa de una mano a otra al tocar fuentes de voltaje de: a) 12.0V , y b) 120 V . c) Si una corriente de 0.001 A apenas se puede sentir y si otra de 0.070 A que pase por el corazón lo afecta gravemente, ¿qué voltaje y condiciones de humedad serían peligrosos para el cuerpo humano?

Solución:

54. Si en un momento dado la resistencia de tu cuerpo es de $4.0 \times 10^4\ \Omega$ debido a la humedad de tu piel, ¿qué voltaje sería suficiente aplicar para que circule a través de ti una corriente dolorosa y peligrosa de 1.0 mA ? ¿Y para una corriente mortal de 50 mA ?

Solución:

55. Un radio portátil utiliza una batería de 9.0 V y, al funcionar, utiliza una corriente de 20.0 mA . ¿Cuál es la resistencia del radio?

Solución:

- 56.** Una secadora de ropa está conectada a un voltaje de 240 V y su resistencia es de 9.5Ω . ¿Qué corriente requiere para su funcionamiento?

Solución:

- 57.** Un tubo de televisión tiene una resistencia de $5.00 \times 10^4 \Omega$ y la corriente que circula es de 150 mA. ¿Cuál es la diferencia de potencial en el tubo?

Solución:



Problema complementario

- 15.** Una forma de entender los conceptos es mediante analogías o similitudes con los fenómenos de nuestro entorno o vida cotidiana. De acuerdo con esto, imagina que al salir de tus sesiones de clase por la noche, y tener la necesidad de utilizar transporte público para llegar a tu casa, el último camión que pasa viene a cupo completo y con mucha gente de pie, hasta en los escalones de subida. Trata de relacionar las columnas a partir de tus conceptos de electricidad y lo que representaría al subir y pasar a través del camión.

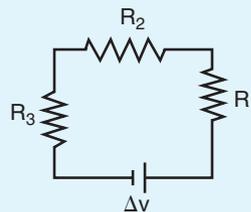
- | | | |
|---|-----|-------------------------|
| 1. Pasar por entre la gente dentro del camión | () | Diferencia de potencial |
| 2. Fricción con las personas a tu paso | () | Átomos del conductor |
| 3. La necesidad de tener que llegar a tu casa | () | Resistencia |
| 4. Las personas dentro del camión | () | Potencia eléctrica |
| 5. Energía requerida para moverte dentro del camión | () | Corriente |

3.12 Circuitos

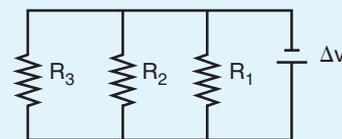


El caso anterior, donde se conecta un alambre a una pila, representa el caso más simple de un *circuito eléctrico*. Un circuito, entonces, es un “camino” cerrado formado por conductores, que está sujeto a una diferencia de potencial entre dos de sus puntos. En un circuito conectamos una serie de aparatos eléctricos, como televisores, refrigeradores, planchas, focos, computadoras, etcétera, que en todos los casos consumen energía. A causa de ello, representamos tales aparatos por resistencias, de manera que, esquemáticamente, los circuitos pueden representarse a la vez como un conjunto de resistencias conectadas entre sí y a una fuente de voltaje, por lo que la ley de Ohm es aplicable para estudiar cuantitativamente los circuitos.

Hay dos formas de conectar las resistencias para formar circuitos. Se trata de formas que dan los nombres a las dos clases de circuitos conocidas: en serie y en paralelo. En una conexión en serie, las resistencias se conectan una detrás de otra, formando un solo camino para el paso de la corriente; mientras que las conexiones en paralelo se hacen de manera que se formen “puentes” entre ellas y, así, el circuito presenta varios caminos para el paso de la corriente (figura 3.13). En el primer caso, la corriente es la misma en todas las resistencias y, en el segundo caso, la diferencia de potencial es la misma para todas las resistencias.



Circuito en serie



Circuito en paralelo

Figura 3.13

En los circuitos interesa calcular el valor que tendría una sola resistencia, llamada resistencia equivalente R_{eq} , o resistencia total, que supliera a todas las resistencias del circuito. Con ese valor es posible conocer la corriente que sería

necesaria para mantener en funcionamiento los aparatos conectados al circuito, ya que, por lo general, el valor de la diferencia de potencial es dato conocido. Para calcular la resistencia equivalente se emplea la ley de Ohm. Consideremos el caso de un circuito en serie. En este caso, entre los bornes de cada resistencia se produce una caída de potencial por la propia resistencia, en concordancia con la ley de Ohm. Entonces, como la corriente es la misma en todo el circuito, la diferencia de potencial total es la suma de los voltajes para cada resistencia (figura 3.14):

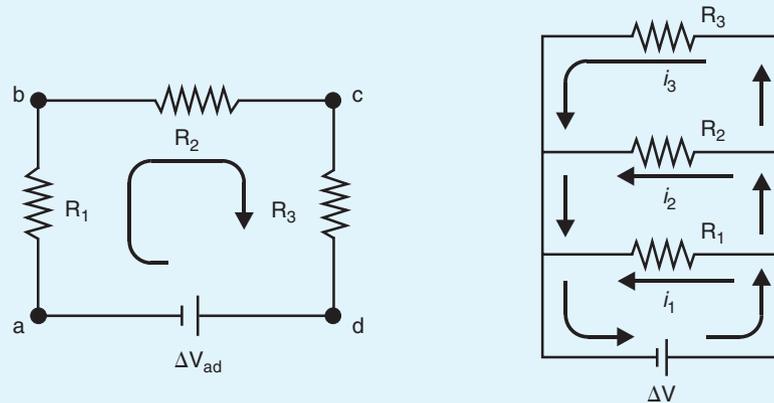


Figura 3.14 Elementos para analizar un circuito en serie y un circuito en paralelo.

$$\Delta V_{ad} = \Delta V_{ab} + \Delta V_{bc} + \Delta V_{cd}$$

aplicando la ley de Ohm a cada caída de potencial en la ecuación anterior, llegamos a la expresión:

$$\Delta V_{ab} = iR_1 + iR_2 + iR_3$$

de donde:

$$\Delta V_{ab} = i(R_1 + iR_2 + iR_3) = iR_{eq}$$

por lo que, para un circuito de tres resistencias conectadas en serie, la resistencia equivalente es

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.14)$$

Para el caso de una conexión en paralelo, tenemos que la diferencia de potencial es la misma para todas las resistencias, por lo que la corriente total es la suma de las corrientes en cada una de las ramas del circuito (figura 3.14):

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

donde

$$i = \frac{\Delta V_{ab}}{R_1} + \frac{\Delta V_{ab}}{R_2} + \frac{\Delta V_{ab}}{R_3}$$

$$= \frac{\Delta V_{ab}}{R_{eq}}$$

esto es, la resistencia equivalente para una conexión en paralelo se encuentra en forma recíproca:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.15)$$

Aquí señalamos una nota precautoria. En este caso, se encuentra el *inverso* de la resistencia equivalente; por lo tanto, para encontrar la resistencia equivalente, primero se realiza la suma del lado derecho de la ecuación y, después, se toma el inverso.

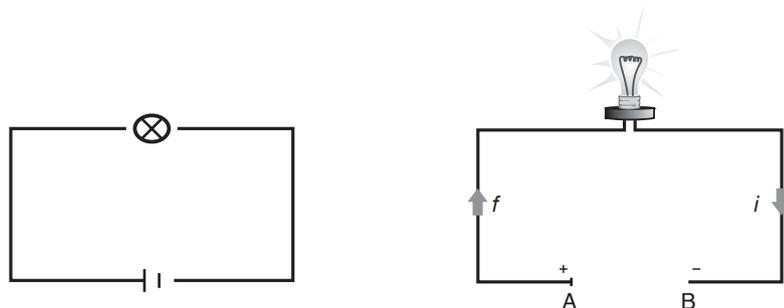
Debe notarse que el ejemplo anterior es para un circuito de tres resistencias. En otros casos, de dos resistencias, o de más de tres resistencias, lo que se hace es quitar un término o agregar los términos necesarios y realizar las operaciones pertinentes.

Actividad por equipos

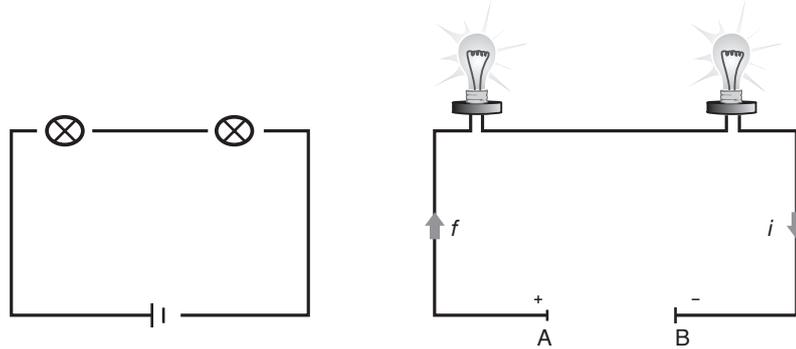


Circuitos y diferencia de potencial

- 1.1** Armen un circuito con un solo foco, como se muestra en la siguiente figura. Midan la diferencia de potencial entre las terminales de la batería y entre los extremos del foco. ¿Cómo se comparan ambas mediciones? Midan la corriente que pasa por el foco. Registren sus mediciones en el cuaderno.



- 1.2** Armen otro circuito que contenga dos focos conectados en serie. Midan la diferencia de potencial para cada elemento del circuito. Midan las corrientes que pasan por cada foco. Ordenen la brillantez de cada foco. ¿Cómo se relaciona esta brillantez con los valores medidos de las corrientes? Anoten las respuestas en el cuaderno.



¿Cómo se compara la diferencia de potencial entre las terminales de la batería en este circuito, con la diferencia de potencial entre las terminales de la batería del circuito de la parte 1.2? Anoten las respuestas en el cuaderno.

- 1.3** Ordenen las diferencias de potencial para los focos 1 y 2 y el foco del circuito de la parte 1.2. ¿Cómo se compara el ordenamiento de la diferencia de potencial con el ordenamiento de la intensidad en la brillantez de los focos? Anoten las respuestas en el cuaderno.
- 1.4** Predigan cómo sería la lectura del voltímetro, si lo usan para medir la diferencia de potencial entre los focos 1 y 2 juntos. Expliquen. Prueben su predicción. Expliquen lo que observan. Anoten las respuestas en el cuaderno.
- 1.5** Armen el circuito con dos focos conectados en paralelo. Midan la diferencia de potencial para cada elemento del circuito. Midan las corrientes que pasan por cada foco. Ordenen la brillantez de cada foco. ¿Cómo se relaciona esta brillantez con los valores medidos de las corrientes?

¿Cómo se compara la diferencia de potencial entre las terminales de la batería en este circuito, con la diferencia de potencial entre las terminales de la batería del circuito de la parte 1.2? Anoten las respuestas en el cuaderno.

- 1.6** Ordenen las diferencias de potencial para los focos 1 y 2, y el foco del circuito de la parte 1.2. ¿Cómo se compara el ordenamiento por diferencia de potencial con el ordenamiento por brillantez? Anoten las respuestas en el cuaderno.

Ejemplo

- En el siguiente circuito con tres resistencias en serie $R_1 = 16\Omega$, $R_2 = 27\Omega$, $R_3 = 12\Omega$, y con una fuente de 11 V, determina: a) la resistencia total o equivalente, b) La corriente en la resistencia equivalente y c) la potencia disipada por cada resistencia.

Solución:



a) Como se encuentran en serie, la resistencia equivalente es la suma de ellas:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 16 + 27 + 12 = 55\Omega, \text{ con este valor usamos la ley de Ohm y } \Delta V = 11V$$

$$b) i_{eq} = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{11}{55} = 0.20 A, \text{ y por estar en serie, tenemos } i_{eq} = i_1 = i_2 = i_3 = 0.20 A.$$

c) La potencia disipada en cada resistencia la obtenemos con la relación $P = i^2 R$:

$$P_1 = i_1^2 R_1 = (0.20)^2 (16) = 0.64 W$$

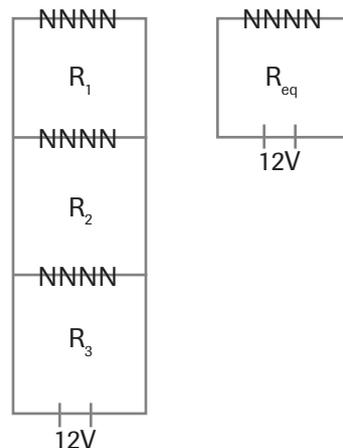
$$P_2 = i_2^2 R_2 = (0.20)^2 (27) = 1.1 W$$

$$P_3 = i_3^2 R_3 = (0.20)^2 (12) = 0.48 W$$

Ejemplo

- Se conectan las resistencias $R_1 = 24\Omega$, $R_2 = 12\Omega$ y $R_3 = 8.0\Omega$ en paralelo a una batería de 12 V, como en la siguiente figura. Determina a) la resistencia equivalente del circuito, b) la corriente en la resistencia equivalente y en cada resistencia, y c) la potencia disipada total y en cada resistencia en forma de calor.

Solución:



a) Para resistencias en paralelo usamos:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

sustituyendo y calculando R_{eq} :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{8.0} = \frac{1}{4} \text{ obtenemos } R_{eq} = 4.0\Omega.$$

b) Para la corriente usamos la ley de Ohm en cada resistencia:

$$i_{eq} = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{12}{4.0} = 3.0A \text{ en paralelo: } \Delta V_{eq} = \Delta V_1 =$$

$$\Delta V_2 = \Delta V_3 = 12V$$

es decir, se aplica el mismo voltaje a cada resistencia; entonces:

$$i_1 = \frac{\Delta V_1}{R_1} = \frac{12}{24} = 0.5 \text{ A}; \quad i_2 = \frac{\Delta V_2}{R_2} = \frac{12}{12} = 1.04 \text{ A}; \quad i_3 = \frac{\Delta V_3}{R_3} = \frac{12}{8.0} = 1.5 \text{ A}$$

Se comprueba que en paralelo la corriente total: $i_{eq} = i_1 + i_2 + i_3 = 0.5 + 1.0 + 1.5 = 3.0 \text{ A}$

c) Para la potencia disipada en energía térmica, utilizamos cualquiera de: $P = i\Delta V = i^2R$ $P_1 = i_1\Delta V_1 = (0.50)(12) = 6.0 \text{ W}$; $P_2 = i_2\Delta V_2 = (1.0)(12) = 12 \text{ W}$; $P_3 = i_3\Delta V_3 = (1.5)(12) = 18 \text{ W}$; donde la total es $P = P_1 + P_2 + P_3 = 6.0 + 12 + 18 = 36 \text{ W}$.

Ejemplo

- Dos focos de filamento con resistencias de 6.0Ω y 3.0Ω se conectan en serie a una batería de 9.0 V . a) ¿Cuál es la corriente que circula en cada resistencia. b) ¿Cuál es la potencia total disipada en el circuito?

Solución:

a) Primero calculamos la resistencia equivalente; por estar en serie: $R_{eq} = R_1 + R_2 = 6.0 + 3.0 = 9.0 \Omega$, luego, la corriente es: $i_{eq} = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{9.0}{9.0} = 1.0 \text{ A}$ y es la misma

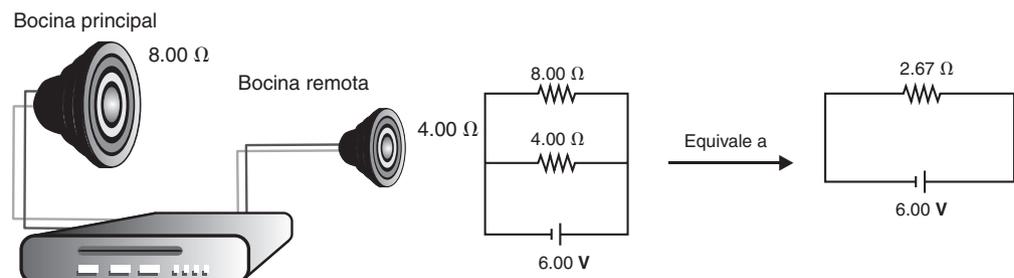
en las dos resistencias; por lo tanto: $i_{eq} = i_1 = i_2 = 1.0 \text{ A}$

b) La potencia disipada en cada resistencia se calcula con los datos que tenemos: $P_1 = i_1^2 R_1 = (1.0)(6.0) = 6.0 \text{ W}$ y $P_2 = i_2^2 R_2 = (1.0)(3.0) = 3.0 \text{ W}$, de donde la potencia total será: $P = P_1 + P_2 = 6.0 + 3.0 = 9.0 \text{ W}$, o con la equivalente: $P = i_{eq}^2 R_{eq} = (1.0)(9.0) = 9.0 \text{ W}$

Ejemplo

- En la mayoría de los sistemas de audio de los automóviles se dispone de cuatro bocinas: dos por cada lado (canal). A la vez, cada par está conectado en paralelo. Si los valores típicos de resistencia son de 8.0Ω y 4.0Ω , y en un momento dado se les aplica a ambas una diferencia de potencial de 6.0 V , determina: a) la resistencia equivalente por canal; b) la corriente en cada bocina; c) la potencia total por canal.

Solución:



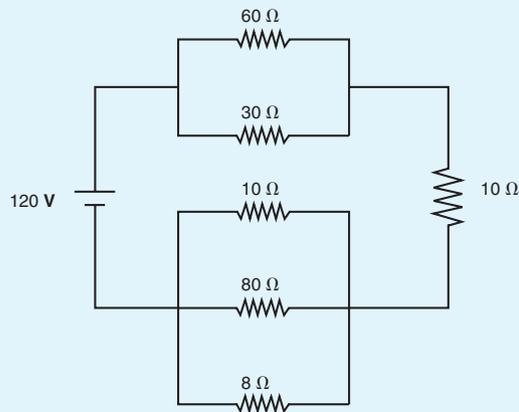
- 66.** Dos focos de resistencias 400Ω y 800Ω están conectados en serie a los extremos de una línea de 120 V . Calcula: a) la resistencia equivalente; b) la corriente en cada resistencia; c) el voltaje en cada resistencia; y d) la potencia disipada por cada resistencia y la potencia total.

Solución:

- 67.** Considerando el problema anterior, realiza los mismos cálculos, pero ahora conectando las resistencias en paralelo.

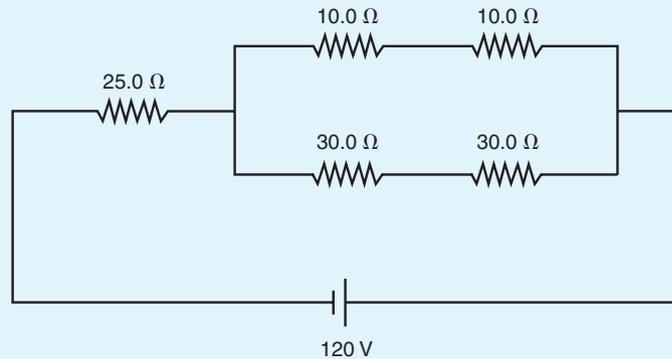
Solución:

- 68.** Calcula la resistencia equivalente del circuito de la figura 68.1 y el voltaje en cada resistencia.



Solución:

69. Calcula la resistencia equivalente del circuito 69 y la corriente en cada resistencia.



Solución:

Resumen

Entre los fenómenos gravitacionales y los fenómenos eléctricos hay analogías que nos hacen pensar en el mismo tipo de fenómeno físico. La masa y la carga se definen de la misma manera: propiedad intrínseca de la materia. Ambas dan lugar a interacciones descritas por leyes semejantes en todo: la ley de gravitación universal y la ley de Coulomb. De ambas leyes se extrae el concepto de intensidad de campo. Decimos que existe un campo eléctrico en cualquier región del espacio, donde un cuerpo de prueba cargado (carga de prueba) siente una fuerza eléctrica. En general, un campo puede pensarse como un conjunto de vectores que tienen valores mensurables a través de todo el espacio. Usamos las líneas de fuerza para representar el campo eléctrico, de manera que éstas se originan en los cuerpos (o salen de ellos) con carga positiva y terminan (entran) en los objetos con carga negativa.

El potencial eléctrico o electrostático (análogo a la presión hidrostática) es la energía potencial eléctrica por unidad de carga. La diferencia de potencial entre dos puntos se refiere al trabajo necesario para transportar un coulomb de carga entre dos puntos. El campo eléctrico está asociado con la diferencia de potencial.

Un dispositivo que puede “transformar” energía química, mecánica o térmica en energía eléctrica se denomina fuente de fem.

La ley de Joule establece que la rapidez de producción de energía térmica (potencia) en un conductor es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente a través de él. La constante de proporcionalidad es la resistencia del conductor.

La ley de Ohm establece que la corriente a través de un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre las terminales del conductor, e inversamente proporcional a su resistencia. Esta ley se utiliza para encontrar los parámetros necesarios en el análisis de circuitos.

3.13 Magnetismo

El magnetismo es un fenómeno conocido desde hace poco más de 400 años antes de Cristo. Por supuesto que los imanes permanentes como los conocemos ahora no se conocían en la antigüedad; pero se conocía muy bien la magnetita, una roca o mineral, cuyos trozos tienen la propiedad de atraer el hierro. La palabra “magnético” tiene sus orígenes en la expresión griega *lithos magnethos*, que se refería al nombre de una ciudad, Magnesia, que se encontraba en Asia Menor, en la región que actualmente ocupa Turquía. La traducción literal de *lithos magnethos* sería *pedra originaria de Magnesia*.

En su libro *De Anima* (405 a. C.), Aristóteles citaba a Tales de Mileto como uno de quienes pensaba que la magnetita tenía alma. Por su parte, también Platón mencionaba la capacidad de la magnetita para atraer el hierro, y observaba, además, que cuando se acerca un trozo de hierro a una *pedra magnética* (*lithos magnethos*), aquél adquiere también la propiedad de atraer el hierro y, por ello, se puede formar toda una cadena de piezas de hierro colgando de una piedra.

A partir de entonces comenzó la aventura intelectual en pos del entendimiento y la comprensión de los fenómenos magnéticos. Se trata de una aventura que prosigue hasta nuestros días. Así, mucho antes del descubrimiento de la corriente eléctrica, los científicos se preguntaban si los fenómenos eléctricos y magnéticos eran esencialmente diferentes. Desde el siglo XVI, se había observado que el rayo parecía conferir a los objetos metálicos propiedades magnéticas. Después del descubrimiento de la corriente, un tal Romagnosi (1802), en Italia, y otro señor Izarn (1804), en Francia, creyeron haber notado pequeñas desviaciones en una brújula bajo la influencia de una corriente.

Estas observaciones, más o menos vagas, recibieron una rotunda confirmación el 21 de julio de 1820, cuando el físico danés Juan Cristian Oersted (1777-1851), un profesor de la Universidad de Copenhague, envió a las sociedades científicas de Europa un folleto en latín, donde daba cuenta de sus experimentos. Oersted demostró, experimentalmente, que un alambre, por el cual fluye una corriente eléctrica, era capaz de desviar la aguja de una brújula. De sus observaciones, Oersted llegó a la trascendental conclusión de que el efecto magnético no podía estar confinado al alambre conductor, sino que está disperso en todo el espacio circundante. Esta intuición, primer indicio de la existencia del campo magnético, revela particularmente el genio de su agudo espíritu.

Debemos notar que los experimentos de Oersted descubren una interacción diferente de las demás interacciones conocidas, para las cuales las fuerzas producidas siempre han sido colineales y a lo largo de la línea que interconecta a las partículas en interacción. En el caso del experimento de Oersted, las fuerzas sobre los polos de las agujas de la brújula son perpendiculares a la línea radial, tomada desde el alambre portador de la corriente hasta el punto donde se observan tales fuerzas.

El fenómeno magnético tiene todavía muchas interrogantes no resueltas; aunque fundamentalmente se ha logrado entender lo suficientemente bien, como para avanzar en el desarrollo tecnológico que involucra el magnetismo. En las siguientes secciones estudiaremos parte de lo que se conoce sobre tal fenómeno.

3.14 Interacción magnética



Preguntas previas

¿Qué es la corriente eléctrica? ¿Cómo se origina? ¿Cómo es la interacción eléctrica?
¿A qué se refieren las expresiones carga fuente y carga de prueba?

El magnetismo es un fenómeno semejante a la electricidad, y para ambos podemos encontrar varias analogías. De las observaciones de Oersted, y con la certeza de que las agujas de las brújulas son imanes, se infiere que las corrientes producen algún tipo de interacción magnética y la ley que rige la interacción entre alambres paralelos portadores de corrientes fue inducida de observaciones experimentales, entre otros, por Ampère. Esto nos lleva a la primera analogía: la corriente es el análogo magnético de la carga eléctrica. Luego, las primeras observaciones demostraron que cuando las corrientes en los alambres están en la misma dirección, éstos experimentan una fuerza de atracción; mientras que si las corrientes tienen direcciones opuestas, experimentan una fuerza repulsiva (figura 3.15). Este resultado es análogo, pero inverso, a la ley de las cargas en electrostática.

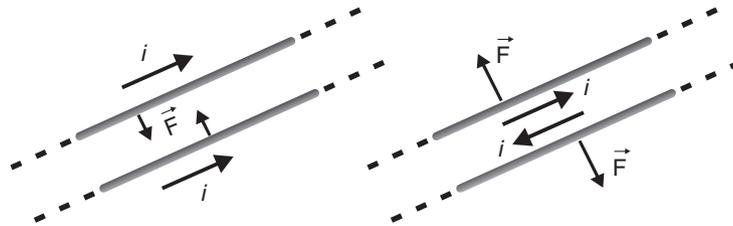


Figura 3.15 Fuerza entre alambres portadores de corriente paralelos.

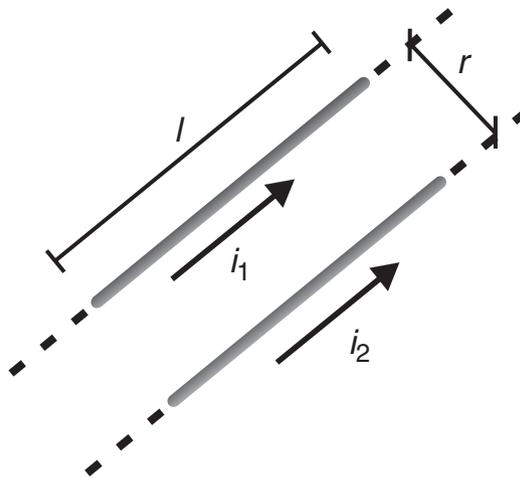


Figura 3.16

Así como la intensidad de la fuerza entre objetos cargados eléctricamente puede medirse para llegar a la ley de Coulomb, la intensidad de la fuerza entre los alambres se puede medir experimentalmente, manipulando como variables la distancia de separación entre los ejes de los alambres paralelos y las intensidades de las corrientes a través de ellos (figura 3.16). Lo primero que se observa es que la fuerza es directamente proporcional al producto de las intensidades de las corrientes, de manera análoga a la fuerza de Coulomb.

Por su parte, la dependencia con la distancia de separación es inversamente proporcional a la primera potencia de la distancia. Este resultado parece esencialmente diferente al resultado de Coulomb y al de la fuerza gravitacional, que dependen del inverso del cuadrado de la distancia. Sin embargo, aquí interviene un factor no considerado antes: la geometría cilíndrica del problema de los alambres. Un resultado no obtenido en este curso por su complejidad matemática indica que el campo eléctrico de un objeto cilíndrico cargado depende del inverso de la primera potencia de la distancia. Así, el caso magnético está en perfecta armonía con el caso eléctrico, cuando en este último se considera una simetría cilíndrica, de donde el resultado queda, entonces, como:

$$\frac{F}{l} = k \frac{i_1 i_2}{r} \quad (3.16)$$

donde la constante de proporcionalidad es $K = \frac{\mu_0}{2\pi}$, con μ_0 como la constante de permeabilidad del vacío, la cual es análoga a ϵ_0 , la constante de permisividad del vacío en electrostática. Ambas constantes están relacionadas con la rapidez de propagación de la luz en el vacío, a través de la expresión $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, cuyo valor aproximado es de 3×10^8 metros por segundo. En la ecuación 3.16 es importante notar que F se refiere a la fuerza que uno de los alambres aplica al otro (corriente fuente y corriente de prueba, respectivamente).

El experimento anterior es fundamental en la definición de unidades. En el sistema internacional, la unidad básica es el ampere, una unidad de corriente eléctrica, de la cual se deriva el coulomb. Se elige el valor exacto $4\pi \times 10^{-7}$ para la permeabilidad del vacío, lo cual a la vez define el tamaño del ampere. Las unidades de μ_0 son, efectivamente, newton sobre ampere al cuadrado.



Actividad

De la relación entre constantes de permisividad y permeabilidad, encuentra el valor aproximado de ϵ_0 y compáralo con su valor exacto de 8.854 187 817. ¿Cuáles deben ser sus unidades?

Procediendo de la misma forma como se hizo para llegar a la definición de campo eléctrico, en el miembro derecho de la ecuación 3.16 aislamos, por ejemplo, la corriente i_1 , y lo que queda lo definimos como la intensidad del campo magnético, cuyo símbolo es B ; esto es:

$$B = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi r} \quad (3.17)$$

En este caso, la corriente i_2 es la *corriente fuente* e i_1 la *corriente de prueba*. Así, la expresión para la fuerza por unidad de longitud sobre el alambre que lleva la corriente de prueba queda como:

$$\frac{F}{l} = i_1 B \quad (3.18)$$



Actividad

Construye una tabla con todas las analogías entre interacciones gravitacional, eléctrica y magnética, señalando semejanzas y diferencias. ¿Podrías concluir que no hay diferencia esencial entre los tres tipos de interacciones?

3.15 El experimento de Oersted



Actividad previa

Variante del experimento de Oersted

Material:

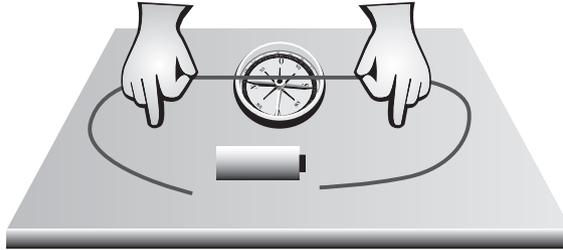
- Una brújula de bolsillo.
- Un alambre grueso de 30 cm de largo, aislado o descubierto.
- Una pila eléctrica (batería) de 1.5 volts de tamaño "D" o "C".

Procedimiento:

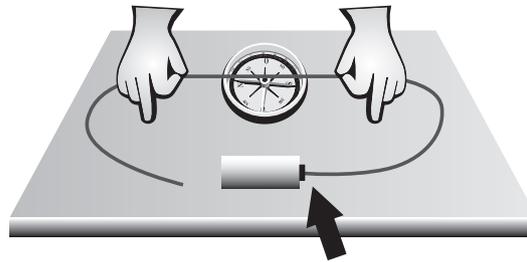
- Coloca la brújula sobre la mesa, mirando hacia arriba. Espera a que se establezca y apunte al norte.



- Coloca la parte media del alambre sobre la aguja de la brújula, también en dirección norte sur. Dobra los extremos del alambre de manera que queden cerca entre sí.

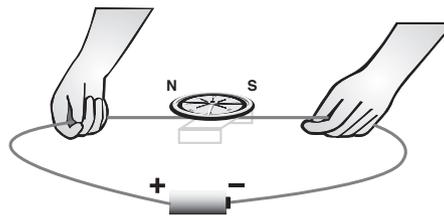


- Toma un extremo del alambre y presiónalo contra uno de los extremos de la pila, y repite esta acción con el otro extremo del alambre y la pila. Anota la reacción de la aguja.



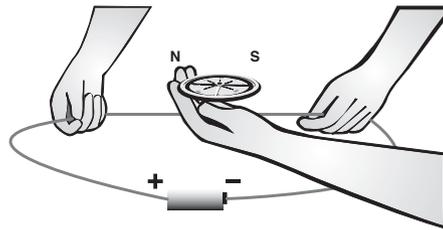
- Desconecta rápidamente. Anota la reacción de la aguja, para que puedas compararla con el experimento realizado por Oersted.

- Repite con las conexiones de la batería invertidas. Observa y anota cuál fue la reacción de la aguja.



- ¿Qué ocurrirá si situamos la brújula por debajo del cable? Anota dos hipótesis sobre lo que crees que pueda ocurrir.

- Toma una hoja de papel de 5×10 centímetros y dobla el lado más largo en dobleces de alrededor de 1 centímetro de alto.
- Coloca el alambre sobre la mesa, de manera que su parte media quede en medio de la dirección norte-sur. Coloca el papel doblado sobre éste, de modo que el alambre quede debajo de uno de los dobleces, y coloca la brújula arriba de los dobleces. Ahora puedes repetir el experimento con la brújula sobre el alambre. (Si el experimento es realizado por dos personas, no necesitarán dobleces ni mesa, ya que uno puede sostener la brújula; y el otro, el alambre y la batería.)



¿Qué ocurre? ¿Se confirman o se rechazan tus hipótesis?

Del experimento de Oersted se infiere que el campo magnético es, como el campo eléctrico, un campo de fuerzas, cuyos vectores se encuentran dispuestos de manera que conforman circunferencias concéntricas alrededor de la corriente. Por consiguiente, a diferencia de las líneas de fuerza, las líneas del campo magnético son cerradas (figura 3.17). La dirección del campo magnético y, en consecuencia la de sus líneas de campo, se encuentra con la regla de la mano derecha. A las líneas de campo magnético se les denomina líneas de inducción. La regla de la mano derecha consiste en lo siguiente: se toma el alambre con la mano derecha, de forma que el dedo pulgar apunte en la dirección en que fluye la corriente; así, los demás dedos muestran la dirección de las líneas de inducción (figura 3.18).

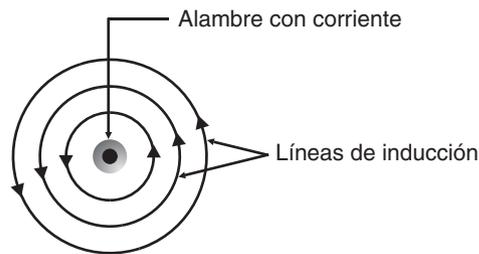


Figura 3.17 Líneas de inducción. El símbolo \bullet indica perpendicular al plano del papel hacia afuera.

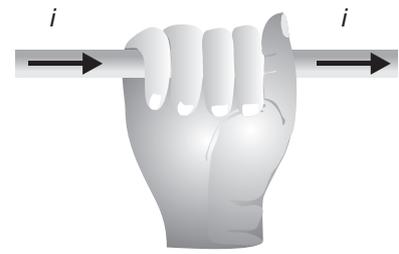


Figura 3.18

De los resultados del experimento de Oersted, confirmamos que los objetos cargados en movimiento producen campos magnéticos. Por consiguiente, la fuerza y la dirección de un campo magnético pueden determinarse en términos de la fuerza aplicada a una corriente de prueba. Así, la intensidad del campo magnético en un punto se mediría como la fuerza por unidad de longitud aplicada sobre una corriente en ese punto. De esta manera, las unidades del campo magnético quedan definidas como

$$\frac{N}{A \cdot m}$$

Esta unidad, newton sobre ampére-metro, recibe el nombre especial de tesla, símbolo T , en honor de Nikola Tesla (1856-1943). Dadas las magnitudes relativas que representan los newton, los metros y los amperes, el tesla es una unidad de magnitud grande, por lo que a veces es común encontrar que el campo magnético se proporcione en unidades más pequeñas, los gauss, cuyo símbolo es G : $1 T = 10\,000 G$.

Ejemplo

- Dos conductores rectos y paralelos uno al lado del otro, están separados por una distancia de 0.070 m entre sus centros y conducen corrientes $i_1 = 15.0\text{ A}$ y $i_2 = 7.50\text{ A}$ en la misma dirección. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que ejerce uno sobre otro por unidad de longitud? ¿Qué magnitud de fuerza se ejerce sobre 2.0 m de cable?

Solución:

Con la ecuación 3.16 y los datos del ejemplo calculamos directamente:

$$\frac{F}{l} = K \frac{i_1 i_2}{r} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} (15.0)(7.50)}{2\pi (0.070)} = 3.21 \times 10^{-4} \frac{N}{m};$$

por ser corrientes en la misma dirección son de atracción entre los conductores y de la misma magnitud de acuerdo con la tercera ley de Newton. La fuerza sobre 2.0 m de cable será:

$$F = l(3.21 \times 10^{-4}) = (2.0)(3.21 \times 10^{-4}) = 6.4 \times 10^{-4} N$$

Ejemplo

- Un conductor recto y largo conduce una corriente de 8.0 A. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético alrededor del conductor a 0.025 m?

Solución:

La corriente que circula por el conductor produce el campo magnético a su alrededor y es la corriente fuente. Usando la ecuación 3.17 para la intensidad de campo B :

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \frac{8.0}{0.020} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ T.}$$

**Problemas propuestos**

70. Una carga en movimiento produce un campo _____.
71. Las líneas de campo magnético son curvas _____.
72. La dirección del campo magnético que rodea la corriente en un conductor se determina usando _____.
73. La unidad de si para el campo magnético es el _____ y otra unidad más pequeña es el _____.
74. La dirección de la fuerza por medio de un campo magnético sobre una corriente es _____ a la dirección de la corriente.
75. El cable denominado duplex está hecho por dos conductores separados por material aislante, el cual también sirve para mantenerlos unidos. Si la separación del aislante es de 0.10 cm, ¿qué fuerza por unidad de longitud se ejerce entre los conductores cuando circulan corrientes opuestas de 12.0 A? ¿Son de atracción o repulsión?

Solución:

76. Un magnetómetro se coloca a 0.010 m de un cable que conduce una corriente eléctrica y marca 0.30 mT en esta posición. ¿Cuál es la corriente que circula por el conductor?

Solución:

77. A cierta altura sobre la superficie de la Tierra, el campo magnético terrestre es de 1.20×10^{-7} T. Si se desea que 1.0 cm de un conductor que transporta corriente tenga esa magnitud, ¿cuál será la corriente necesaria?

Solución:

78. Una línea de alto voltaje conduce una corriente de 1 500 A en un sitio donde el campo magnético terrestre es de 5.0×10^{-4} T. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza magnética sobre 100 m de cable?

Solución:



Problemas complementarios

16. A través de dos conductores paralelos y rectos, separados por 4.50 mm, circulan corrientes iguales de 15 500 A en direcciones opuestas. ¿Cuál será la magnitud de la fuerza entre ellos? ¿Es de atracción o de repulsión?

Solución:

17. Un excursionista lee una brújula por debajo de una línea de alta tensión que está a 5.60 m de altura sobre él, la cual transporta una corriente de 800 A. ¿Cuál es campo magnético producido en este punto por el conductor? Si la magnitud del campo terrestre es de alrededor de $5 \times 10^{-4} \text{T}$, ¿la línea de alta tensión es realmente un problema?

Solución:

18. Se tienen tres conductores paralelos donde el conductor que está en medio equidista de los otros. Por los tres circulan corrientes de las mismas magnitud y dirección. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre el conductor del centro, debido a los conductores de los lados?

Solución:

3.16 Imanes



Actividad

Un **electroimán**. La relación entre magnetismo y electricidad puede explorarse aún más con la construcción de un electroimán sencillo. El material necesario consiste en un clavo o tornillo grande, alambre aislado de al menos 0.65 mm de diámetro,

una pila y algunos clips (parte del material del experimento de Oersted). Enrolla el alambre alrededor del clavo en vueltas apretadas (unas 50 vueltas). Si es necesario, hazlas en varias capas. Los extremos del alambre deben quedar libres para conectarse a los extremos de la pila. Una vez enrollado el alambre, conecta los extremos a la pila, sujetándolos con los dedos o usando cinta o una liga.

Precaución: el sistema puede llegar a calentarse; si es el caso, suelta inmediatamente la pila y no trabajes con sustancias inflamables cerca. Mientras la corriente circula por el alambre, el clavo se comportará como un imán bastante fuerte: un electroimán. Acerca el electroimán a un clip. ¿Qué sucede? ¿Qué sucede al acercar este clip que se pegó al clavo a otro clip? ¿Cómo podrías darte una idea de la “fuerza” del imán? ¿Qué sucede si súbitamente desconectas el alambre? ¿Por qué se calienta el alambre mientras la corriente fluye a través de él?

De los descubrimientos de Oersted y Ampère, queda establecido que el fenómeno magnético y la consecuente interacción magnética se manifiestan únicamente cuando tenemos objetos cargados en movimiento relativo. No obstante, también es evidente que los imanes* interactúan magnéticamente, por lo que surge la cuestión de ¿cómo es posible que dos imanes entre sí, o un imán al acercarse a un objeto que contenga hierro, manifiesten fuerzas magnéticas aun estando originalmente en reposo? La respuesta es clara: a nivel atómico o molecular, sus electrones están en movimiento, por lo que dentro de *todos* los objetos materiales hay corrientes atómicas que producen campos magnéticos también microscópicos.



Pero, continuamos preguntándonos: ya que todo material tiene corrientes microscópicas, ¿cómo es posible que sólo ciertos materiales se comporten como imanes? Para contestar dicha pregunta necesitamos mirar con más detalle la composición atómica o molecular de las sustancias. Es evidente que solamente los materiales que contienen hierro son atraídos fácilmente por imanes. Para explicarlo, podemos pensar que un trozo de material de este tipo está compuesto por pequeñas regiones (microscópicas), en las que sus corrientes atómicas o moleculares están dirigidas de manera que producen campos magnéticos en la misma dirección.

A esas regiones se les da el nombre de *dominios magnéticos*. Así, cuando los dominios magnéticos están alineados (figura 3.19 a) tenemos la estructura microscópica típica de un imán y cuando los dominios magnéticos se encuentran orientados al azar (figura 3.19 b) tenemos un noimán. El campo magnético total es la suma de todos los campos magnéticos microscópicos, de tal suerte que como en un noimán siempre podemos encontrar campos microscópicos con direcciones exactamente opuestas, la suma total nos dará cero.

* Un término utilizado comúnmente para designarlos es *magneto*; esta palabra puede ser un arcaísmo o un anglicismo, según se considere. La palabra aceptada en español es *imán*.

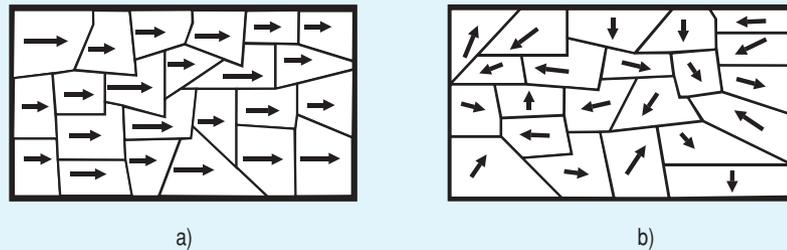


Figura 3.19 Dominios magnéticos.

Los imanes naturales (los *lithos magnetos*) son de la primera clase de materiales (con dominios magnéticos alineados) y el resto de los materiales de la segunda clase. El proceso análogo a la electrización es la magnetización, mediante la cual los noimanes pueden transformarse en imanes. Este proceso consiste, simplemente, en la alineación de los dominios magnéticos. De esta manera, al magnetizar un material, su campo magnético total, definido como suma de todos los campos magnéticos microscópicos, deja de ser cero. El noimán se convierte en un imán.

Hay dos tipos esenciales de imanes: permanentes y transitorios. Los primeros son aquellos cuyas propiedades magnéticas son intrínsecas; son los imanes naturales, los *lithos magnetos* de la Antigüedad. De esto inferimos la diferencia entre las dos clases de imanes: el tiempo en que permanecen con sus propiedades magnéticas: los imanes permanentes quedan magnetizados por periodos larguísimos (a veces milenios); en tanto que los imanes transitorios quedan magnetizados durante periodos relativamente cortos, que van desde algunos segundos hasta varios días.

Entonces, ¿cómo le haríamos para magnetizar un material magnetizable? Líneas arriba contestamos parcialmente esta pregunta; pero, ¿cómo hacemos para alinear los dominios magnéticos? La respuesta es simple: le acercamos un imán. Al acercarle el imán al material, sus dominios magnéticos sienten las fuerzas a través del campo magnético y se alinean de acuerdo con la dirección del campo magnético *externo*. ¿Cómo podrías relacionar esto con lo que sucede con un electroimán?

Ya que el material está magnetizado —lo cual puede comprobarse porque es capaz de atraer algunas piezas de objetos que contengan hierro—, lo dejamos durante cierto tiempo, luego del cual constataremos que perdió su magnetización. ¿Por qué los imanes transitorios se desmagnetizan con cierta facilidad?



La explicación se encuentra en el movimiento de agitación térmica. ¿Puedes dar tal explicación?³

³ El movimiento térmico existe siempre; entonces, cuando los átomos y/o moléculas de un material se encuentran en agitación, al cabo de un tiempo este movimiento acaba por desalinear los dominios, perdiéndose la magnetización.

3.17 Polos magnéticos



Consideremos un alambre que lleva una corriente i , doblado en forma de circunferencia. A tal configuración la denominamos una *espira*. De acuerdo con la regla de la mano derecha, las líneas de inducción se asemejan a anillos concéntricos, como se muestra en la figura 3.20 (a). Conforme nos movemos hacia el eje de la espira, las líneas de inducción se van deformando hasta que, exactamente en el centro, las líneas de inducción son líneas prácticamente rectas que se extienden hasta una distancia muy grande comparada con el radio de la espira (figura 3.20b). El vector de campo magnético exactamente sobre el eje es perpendicular al plano de la espira. Tal sistema conforma un *dipolo magnético* y decimos que la región hacia donde apunta el vector de campo magnético es el polo norte, y la región opuesta el polo sur.

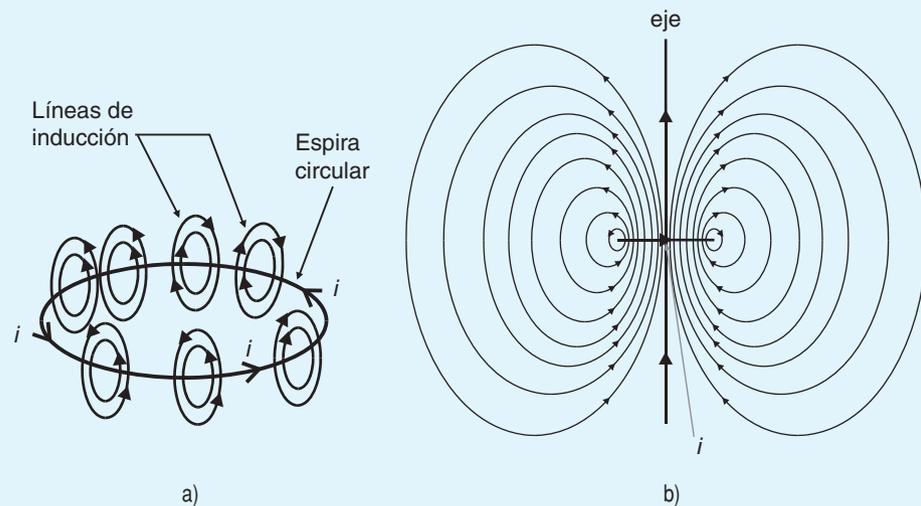


Figura 3.20 a) Líneas de inducción para una espira circular, b) la misma espira vista de canto.

A nivel microscópico, los dominios magnéticos se comportan como dipolos magnéticos individuales, de manera que un imán se divide en dos regiones macroscópicas, el polo sur y el polo norte. Lo que debe quedar perfectamente establecido es que un polo magnético no es un punto en un imán, sino una región. Así, si partimos al imán por la mitad, tendremos dos imanes con sus polos norte y sur; si volvemos a partir estos imanes, aunque no sea por la mitad, tendremos ahora cuatro imanes con sus polos norte y sur, y así sucesivamente, hasta llegar a la molécula misma que, a la vez, también será un dipolo magnético (figura 3.21). La interacción entre imanes se da a través de sus polos con una regla semejante a la ley de las cargas en electrostática: *polos iguales se repelen y polos distintos se atraen*.

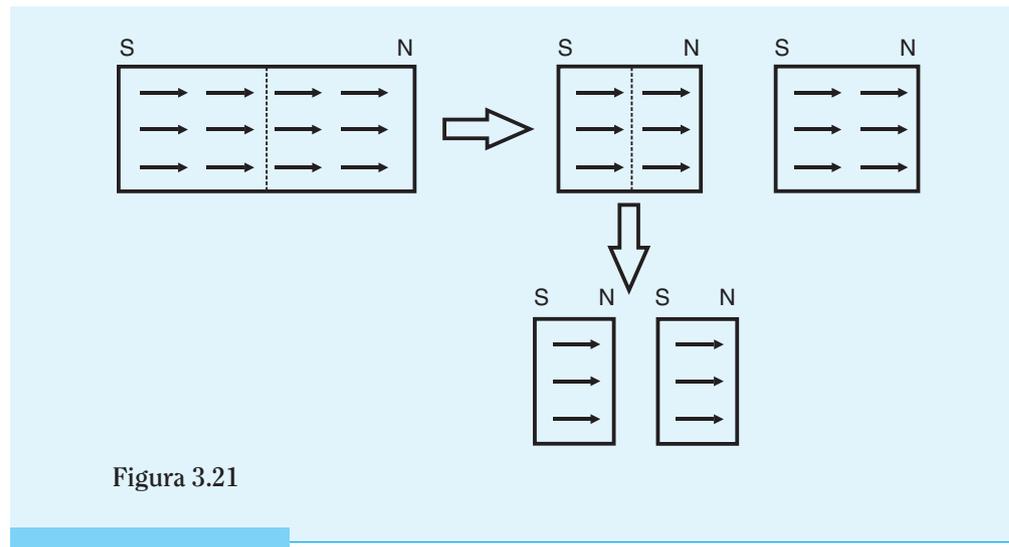


Figura 3.21

3.18 Magnetismo terrestre



Es de todos conocido que la Tierra posee un campo magnético. Lo que todavía no se conoce exactamente es cómo se produce tal campo magnético. Sin embargo, se considera que la Tierra se comporta como si tuviera un imán de barra en su interior, ya que la forma del campo magnético es la forma que adquiere el campo magnético de un imán de barra (figura 3.22). Debe quedar claro que *no afirmamos* que la Tierra es o tiene un imán de barra, sino que *se comporta* como si lo tuviera.

Por otro lado, de la sección anterior sabemos que un imán de esa naturaleza es un conjunto de espiras microscópicas. Así, otra manera de explicar el campo magnético terrestre consiste en pensar que dentro de la Tierra existe una espira de corriente, cuyo eje está casi alineado con el eje de rotación terrestre; como en el caso del imán, éste también es un modelo, no la realidad existente.

El polo norte magnético se encuentra realmente en el norte de Canadá, por lo que la aguja de una brújula no apunta exactamente hacia el norte. La diferencia entre el polo norte geográfico y el polo norte magnético se denomina *declinación magnética*, la cual es una cantidad que varía entre 25° E y 20° O, dependiendo del lugar donde se mida. Lo más sorprendente de esto es que el valor cambia ligeramente año con año. Por ejemplo, en 1580 la declinación en Londres era de 11° E, medida por Gilbert. En 1657 fue de 0° , y alcanzó un valor de 25° O en 1820. Durante los últimos millones de años, el eje magnético de la tierra ha cambiado de dirección varias veces. Hace años, entre 0.7 y 2.5×10^6 años, lo que hoy conocemos como polo norte magnético se encontraba en el hemisferio sur.

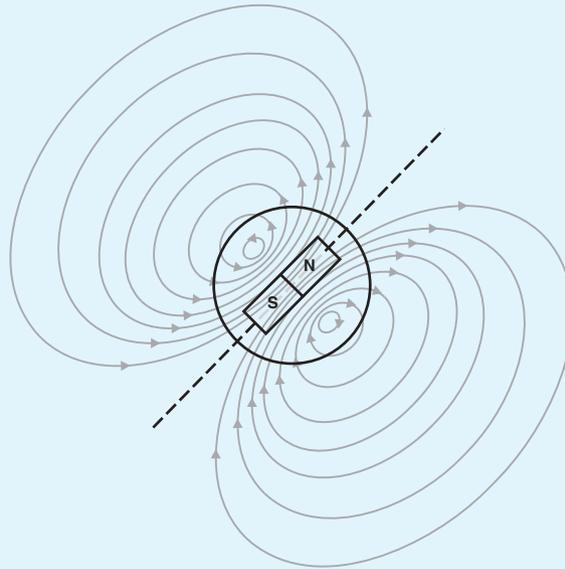


Figura 3.22 Vista esquemática bidimensional del campo magnético terrestre.



Actividad por equipos

Imanes y campos magnéticos

1. Materiales magnéticos

- 1.1** Consigan piezas manejables (pequeñas) de metal, corcho (o similar), plástico, madera dos —de cada una— y dos imanes. De acuerdo con la interacción magnética de los imanes y los otros materiales, clasifíquenlos en tres categorías. Hagan una lista de los materiales de cada categoría. Por ejemplo: Categoría 1 Atracción fuerte, Categoría 2 atracción débil, Categoría 3 Ninguna Atracción.

Categoría 1

Categoría 2

Categoría 3

- 1.2** Llenen la siguiente tabla con una palabra o dos que describan la interacción magnética entre miembros de las mismas y de diferentes categorías. (F) Atracción fuerte, (D) Atracción débil y (N) Ninguna atracción.

Categoría	Interacción magnética	Entre categorías 2 con 1 y 2 con 3	Interacción entre categorías 1 y 3
1			
2			
3			

1.3 ¿Todos los metales pertenecerán a la misma categoría? ¿Por qué?

1.4 ¿A qué categoría pertenecen los imanes? ¿Están todos los objetos en la misma categoría que los imanes?

1.5 Consigan un imán permanente y un objeto que sea atraído por éste, pero no repelido. Imaginen que no saben cuál de ellos es el imán. Usando sólo estos dos objetos, encuentren una manera de determinar qué objeto es el imán permanente. (Sugerencia: ¿hay partes en cualquiera de los dos objetos que no interaccionan tan fuertemente como otras?)

1.5.1 Las partes de un imán permanente que interaccionan más fuertemente con otros materiales son los polos magnéticos. ¿Cuántos polos tiene el imán que están usando? Expliquen cómo pueden probar su afirmación.

- 1.5.2** Usando tres imanes, encuentren una manera de distinguir entre un tipo de polo y otro.

- 1.6** Describan cómo puede usarse un trocito de corcho, suspendido de un hilo aislante, para probar si un objeto está cargado.

- 1.6.1** Predigan qué sucederá cuando un trocito de corcho eléctricamente neutro se acerca a uno de los polos del imán. Anoten sus observaciones. Consigan el corcho y prueben su predicción.

- 1.6.2** Basándose en sus observaciones, predigan qué sucederá cuando el corcho se acerque al otro polo del imán. Prueben su predicción.

- 1.6.3** ¿Existe una carga neta diferente de cero en el polo norte (o en el polo sur) de un imán? Expliquen sus razones.

- 1.7** Se sujeta un clip a un hilo aislante y se suspende de un popote (o algo semejante). Este sistema se coloca de manera que el clip cuelgue dentro de un vaso forrado previamente con papel aluminio como se muestra.



- 1.7.1** Predigan qué le sucederá al clip cuando una varilla cargada se acerque al vaso. Expliquen en términos del campo eléctrico dentro del vaso forrado de aluminio. Comprueben su predicción.



1.7.2 Predigan qué pasaría si el clip se encontrara fuera del vaso. Expliquen el razonamiento y luego prueben la predicción.



1.7.3 Acerquen un imán al vaso y observen lo que sucede al clip dentro del vaso. Registren sus observaciones.



1.8 De acuerdo con sus observaciones en las partes 1.3 y 1.4, ¿podría decirse que la interacción magnética es la misma o es diferente de la interacción eléctrica? Expliquen sus razones.

2. Campos magnéticos

- 2.1** Consigan una brújula y utilícenla para explorar la región alrededor de un imán de barra. Describan el comportamiento de la aguja de la brújula en las regiones cercanas a los polos y en la región entre los polos. ¿A qué categoría de objetos de la sección 1.1 pertenece la aguja de la brújula. Expliquen.



- 2.2** Coloquen la brújula lejos de otros objetos. Agítenla, déjenla y describan el comportamiento de aguja. ¿Se comporta como si estuviera dentro de un campo magnético?

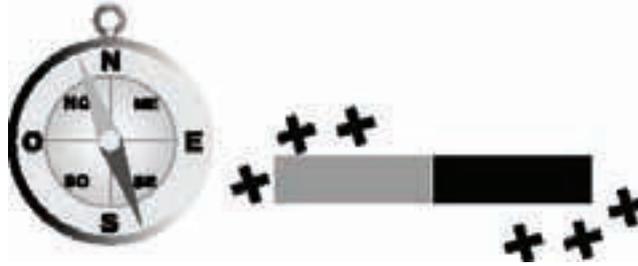
- 2.2.1** Podemos explicar el comportamiento de la aguja de la brújula suponiendo que interacciona con la Tierra y que la Tierra pertenece a una de las categorías de la sección 1.1. De acuerdo con sus observaciones, ¿a qué categoría pertenece la Tierra? Expliquen sus razones.



- 2.2.2** Definamos el polo norte de un imán como el extremo que apunta hacia la región ártica de la Tierra, cuando la aguja no se encuentra interactuando con otros objetos cercanos. Con base en esta definición, utilicen la brújula para identificar el polo norte de un imán de barra.



- 2.3** Pongan el imán de barra sobre una superficie horizontal, de manera que pueda tener una posición como la que se observa en la siguiente figura. Coloquen la brújula en cada uno de los puntos marcados por una X, y dibujen una flecha que muestre la dirección en la que apunta la parte norte de la aguja de la brújula.



2.4 ¿Cómo influye la distancia entre la brújula y el imán en la interacción?

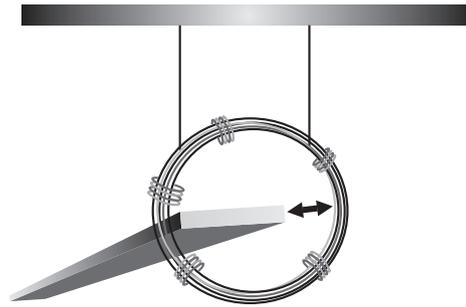
2.5 Definimos la dirección del campo magnético en un punto como la dirección en la que apunta el norte de la aguja cuando la brújula se encuentra en ese punto. Transformen las flechas de la sección 2.3 en vectores de campo magnético; esto es, dibújenlas de manera que contengan la información sobre la magnitud y la dirección del campo.

3.19 Electromagnetismo



Actividad

Necesitarás un imán de barra muy “fuerte” y una bobina hecha con unas cincuenta vueltas de alambre conductor. Enrolla el alambre de manera que quede como una dona por donde pase libremente el imán; pero deja libres los extremos del alambre en longitud de 30 a 40 cm en partes opuestas de la bobina-dona. Enrolla algo de otro trozo de alambre alrededor de la bobina, para que ésta quede firmemente unida y sólida. Sujeta los extremos libres del alambre de la bobina a una barra o palo horizontal, que deberás colocar sobre un soporte de manera que quede horizontal (véase figura de la siguiente página) conectándolos, ya sea por medio de caimanes u otro alambre.



Ahora viene la parte que requiere práctica y habilidad. La idea es hacer que la bobina suspendida se “columpie” metiendo y sacando el imán de barra en ella. La cuestión es encontrar la frecuencia de oscilación de la bobina suspendida como se hace con un columpio. Al comenzar a oscilar, al igual que haces en un columpio para aumentar la amplitud del movimiento, deberás introducir el imán (empujar) cuando la bobina se aleja y sacarlo (jalar) cuando la bobina se acerca, de manera rítmica. ¿Cómo se explica este efecto? ¿Qué sucedería si desconectas los extremos de la bobina y haces lo mismo con el imán?

Hasta el momento hemos tratado los fenómenos eléctricos y magnéticos de manera separada como si fueran independientes. Sin embargo, toda la discusión sobre magnetismo nos deja ver que éste tiene un origen eléctrico, ya que el campo magnético se produce por objetos cargados en movimiento. Los fenómenos eléctrico y magnético conforman una unidad denominada *electromagnetismo*, que fue descubierta en la primera mitad del siglo XIX por Michael Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Estados Unidos. Ambos trabajaron sin conocerse ni saber lo que uno y otro estaban haciendo.

Faraday y Henry descubrieron que puede generarse corriente eléctrica en un alambre conductor por el simple movimiento de un imán dentro de una bobina (figura 3.23), sin necesidad de utilizar pilas ni otro dispositivo eléctrico para producir corriente. Lo que descubrieron fue que el movimiento relativo entre un imán y un alambre conductor *induce* una diferencia de potencial. Luego, como los imanes son fuentes de campo magnético, la esencia de esta situación es que el movimiento relativo del imán y la bobina, produce un cambio en el campo magnético respecto de la bobina; esto es, el campo magnético es el que se mueve en relación con la bobina. El término “inducir” es la palabra técnica adecuada para este fenómeno. Aquí el punto clave es que la *inducción* se da ya sea porque un imán se mueve respecto de un conductor estacionario, o porque el conductor se mueve respecto de un imán estacionario (figura 3.24). El fenómeno por el cual se induce voltaje por variación de un campo magnético se denomina *inducción electromagnética*.

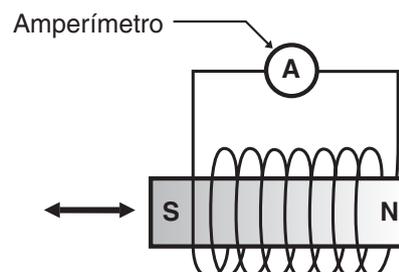


Figura 3.23

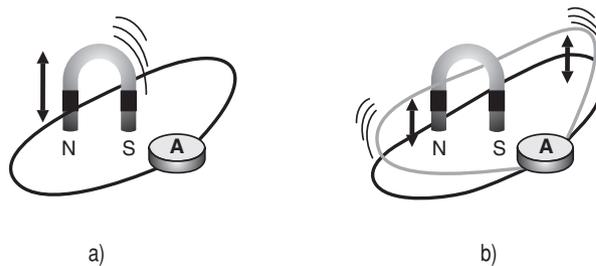


Figura 3.24 a) El imán se mueve con el alambre fijo.
b) El alambre se mueve con el imán fijo.

En cuanto a la bobina que se utiliza en los experimentos, otro hecho observado fue que cuanto mayor sea el número de vueltas que posee, mayor será el voltaje inducido. Luego, respecto del imán, se observó que cuanto más rápido se mueva en relación con la bobina, también será mayor el voltaje inducido. Todos estos resultados se resumen en la ley de Faraday:

El voltaje inducido en una bobina es directamente proporcional al número de vueltas, multiplicado por la rapidez con la que cambia el campo magnético dentro de la bobina.

La intensidad de la corriente inducida depende de la resistencia tanto de la bobina, como del circuito a la que esté conectada, de acuerdo con la ley de Ohm.

En la vida diaria una gran cantidad de dispositivos funcionan por inducción electromagnética. Por ejemplo, los detectores de metales en aeropuertos, oficinas y tiendas. Éstos son arcos o placas paralelas que tienen bobinas integradas en su estructura, conectadas a un circuito, de manera que el paso de la corriente produce un campo magnético en ellas. Así, cuando una persona que lleva un objeto metálico pasa por el detector, se altera el campo magnético, se induce voltaje y suena la alarma.



Ahora estamos en posición de contestar las preguntas de la actividad inicial. El hecho de introducir el imán en la bobina y sacarlo de ella induce fems en direcciones opuestas. Estas fems producen corrientes, igualmente en direcciones opuestas: una dirección para cuando el imán entra y otra dirección cuando el imán se retira. Cada una de tales corrientes produce un campo magnético, esto es, la bobina se comporta como un dipolo magnético, por lo que interacciona con el imán. Al introducirlo la bobina es repelida y al sacarlo es atraída. ¿Podrías hacer en tu cuaderno un dibujo de los vectores de campo magnético en cada situación?

3.20 Generadores y corriente alterna

La producción de corriente la explicamos en términos de una fem inducida; de hecho, los investigadores originales, Faraday y Henry encontraron que la magnitud de la fem máxima

inducida en un alambre conductor que se mueve dentro de un campo magnético está dada por

$$\varepsilon = Blv \quad (3.19)$$

donde B es la intensidad de campo magnético dentro del cual se mueve el alambre, l la longitud del alambre, y v la rapidez con la que se mueve el alambre dentro del campo magnético.



Actividad

Pareciera que la combinación de unidades no tiene relación con las unidades de fem (volts). Demuestra que las unidades del producto de tales cantidades son volts.

Para obtenerse el efecto máximo, el alambre debe colocarse de manera perpendicular respecto de la dirección del campo magnético. A veces se dice que tal movimiento “corta” las líneas de inducción. Si el alambre se mueve de manera paralela al campo magnético, no se observa ningún efecto.

Ejemplo

- Una barra conductora de 1.50 m de longitud se mueve a $6.0 \frac{m}{s}$ en dirección perpendicular a un campo magnético de 0.85 T. ¿Cuál será la fem producida en la barra, si su resistencia es despreciable? ¿Cuál es la corriente inducida si la resistencia de la barra es 2.0Ω ?

Solución:

El valor de la fem se obtiene sustituyendo, para la primera pregunta:

$$\varepsilon = Blv = (0.85)(1.50)(6.0) = 7.6 \text{ V. Si ahora consideramos la resistencia, aplicamos la ley de Ohm: } i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{7.6}{2.0} = 3.8 \text{ A.}$$

Ejemplo

- La fem inducida en una barra de longitud l es 0.150 V cuando se mueve en forma perpendicular a un campo magnético de 0.65 T con una rapidez de $2.0 \frac{m}{s}$. ¿Cuál será la longitud de la barra? Si la resistencia de la barra es de 100Ω , ¿qué potencia se disipa en forma de calor en la barra? Si la barra se mueve paralela a campo, ¿qué fem se induce?

Solución:

Despejando la longitud de la relación para la fem, tenemos:

$$l = \frac{fem}{Bv} = \frac{0.150}{(0.65)(2.0)} = 0.12 \text{ m.}$$

Luego, usando la ley de Ohm calculamos la corriente inducida:

$$i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{0.150}{100} = 1.50 \times 10^{-3} \text{ A.}$$

Con este valor calculamos la potencia disipada por efecto Joule: $P = i^2 R = (1.50 \times 10^{-3})^2(100) = 2.25 \times 10^{-4} \text{ W}$; ésta es la energía disipada por unidad de tiempo en forma de calor. Para la última pregunta, como la barra se mueve paralela al campo B no hay fem inducida.



Problemas propuestos

79. La magnitud de la fem inducida en un conductor recto que se mueve en un campo magnético depende de su _____ y su _____.
80. No se produce fem si el movimiento del conductor es _____ al campo.
81. Las líneas de campo magnético de la Tierra están dirigidas de norte a sur, y en los objetos metálicos al moverse en su superficie se producen fem. Analiza el movimiento de un objeto conductor y contesta "sí" o "no", si la fem inducida se mueve hacia él:
Norte _____ Sur _____ Este _____ Oeste _____
82. En una ciudad el campo magnético terrestre esta dirigido hacia el sur. ¿Cuál será el valor de la fem inducida en el fuselaje, a lo largo de un avión de 55.0 m al moverse hacia el este con rapidez de $720 \frac{km}{h}$, si dicho campo magnético es de $5.00 \times 10^{-6} \text{ T}$?

Solución:

83. Supón que una barra conductora se mueve a $6.0 \frac{m}{s}$ perpendicularmente a un campo magnético de 0.800 T. Si su longitud es de 1.60 m y su resistencia eléctrica es despreciable, ¿cuál será la fem inducida en la barra?

Solución:

- 84.** En los extremos de una barra conductora que se mueve en un campo magnético de 0.100 T se genera una fem de 0.300 V. ¿Qué intensidad de campo magnético será necesario para producir una fem de 1.50 V entre los extremos de la barra, si todos los factores restantes no cambian?

Solución:



Problemas complementarios

- 19.** Un satélite de comunicaciones que gira en órbita alrededor de la Tierra sobre el ecuador, con una rapidez orbital de $8\,450 \frac{m}{s}$, tiene una antena de recepción de 2.00 m de longitud semejante a una varilla y está orientada perpendicularmente al campo magnético de la Tierra. A la altura del satélite, la intensidad del campo magnético terrestre es $8.00 \times 10^{-5} T$. ¿Cuál será la fem inducida en la antena del satélite?

Solución:

20. Para producir un chispazo eléctrico en un entrehierro de 10.0 cm al vacío, se requiere una diferencia de potencial de 950 V. Si este voltaje se alcanza con una barra de 1.80 m que se mueve en un campo magnético de 0.80 T, ¿con qué rapidez debe moverse la barra?

Solución:

Una aplicación técnica común es el dispositivo llamado *generador de corriente alterna*. En los experimentos pioneros de Faraday y Henry se observa que cuando el imán se introduce repetidamente en la bobina, la dirección de la fem inducida —y por consiguiente, de la corriente inducida— cambia de manera alternada; esto es, la corriente tiene primero una dirección determinada y luego se invierte esa dirección.

La frecuencia de cambio de la fem inducida depende de la frecuencia con que se introduce y se saca el imán de la bobina, es decir, de la frecuencia con que cambia el campo magnético. A pesar de que con este procedimiento obtenemos corriente eléctrica, resulta más práctico mover una bobina dentro de un campo magnético estático, esto es, dentro de un imán estacionario. La figura 3.25a muestra el esquema de un arreglo de esta naturaleza, el cual recibe el nombre de *generador*.

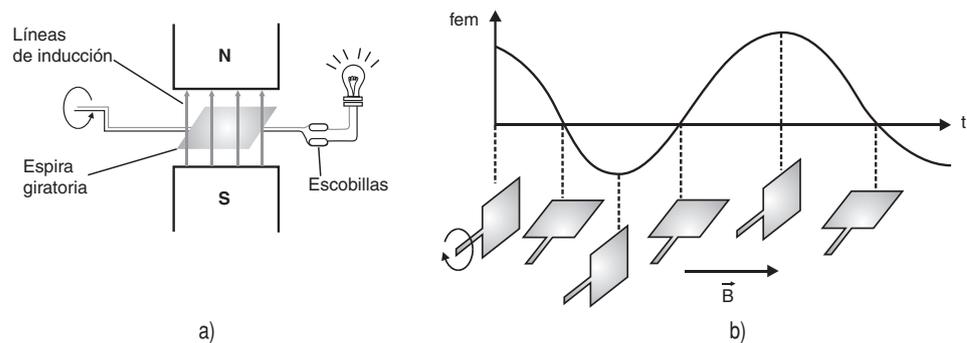


Figura 3.25 a) Esquema simple de un generador. b) Al girar la espira se induce una fem (y una corriente), una ventana completa es un ciclo completo en la fem.

La manera en que funciona es la siguiente: por algún medio mecánico la bobina se hace girar dentro del campo magnético generado por el imán. Así, al girar, se observa un cambio en el número de líneas de inducción encerradas por la bobina; cuando el plano de la bobina es perpendicular a las líneas de inducción, se encierra el número máximo de éstas.

Con el giro, menos líneas de inducción se van encerrando, con lo cual el valor de la fem va disminuyendo, hasta que el plano de la bobina queda paralelo a las líneas de inducción; en este momento no se encierran líneas y la fem inducida es cero. Al continuar girando, va en aumento el número de líneas de inducción encerradas, por lo que la fem nuevamente comienza a aumentar en magnitud, pero *su sentido se invierte*, de manera que también se invierte la dirección de la corriente inducida.

Tal proceso continúa hasta que la bobina vuelve a quedar perpendicular al campo, donde obtiene su valor máximo en el sentido opuesto. Al continuar girando nuevamente, el valor va disminuyendo hasta cero y así sucesivamente (figura 3.25b). La corriente así obtenida se llama *corriente alterna* (CA), ya que su dirección se invierte con cierta frecuencia. La corriente que se obtiene con las pilas es *corriente directa* (CD), que se denomina así porque su dirección siempre es la misma. En nuestras casas utilizamos corriente alterna producida por los grandes generadores que se encuentran en las centrales eléctricas de la CFE, cuya frecuencia es de 60 Hz, lo cual significa que cambia su dirección 60 veces por segundo.

En principio, un *motor eléctrico* se construye de la misma manera que un generador. La diferencia entre ellos es que en vez de hacer girar la bobina por dispositivos mecánicos para obtener corriente, se hace pasar corriente a través de la bobina, con lo que ésta se mueve.

3.21 El transformador

Supongamos que tenemos dos bobinas, una cerca de la otra, y a través de una de ellas hacemos pasar una corriente variable, por ejemplo una CA. La corriente alterna produce un campo magnético también alterno. La segunda bobina registra los cambios en el campo magnético (figura 3.26), de manera que, de acuerdo con la ley de Faraday, se induce una corriente en ella. Éste es el principio de funcionamiento del dispositivo denominado *transformador*. Un transformador simple se construye con dos bobinas enrolladas en un núcleo de hierro común: una de ellas se conecta a una fuente de voltaje alterno, a la cual se le conoce como bobina de *entrada*; y la otra bobina se conecta a algún circuito externo y se conoce como bobina de *salida*.

El diseño del transformador tiene dos características; la primera es que las bobinas no deben tener contacto físico (figura 3.27), y la segunda es que la bobina de salida debe tener un número de vueltas diferente del número de vueltas de la bobina de entrada.



(¿Puedes explicar el porqué de esta condición?).⁴ Entonces, cuando la CA circula en la bobina de entrada, se induce una CA en la bobina de salida. Así, si la bobina de salida tiene un mayor número de vueltas, el voltaje inducido será mayor que el de entrada, y viceversa.

⁴ Si las bobinas tuvieran el mismo número de vueltas, la ley de Faraday indica que la fem inducida tendría el mismo voltaje que el voltaje de entrada y entonces no se tiene ningún beneficio del dispositivo.

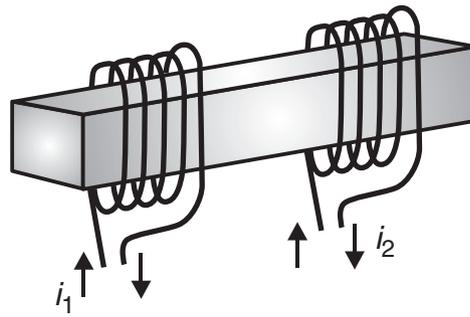


Figura 3.26 Esquema de un transformador simple.

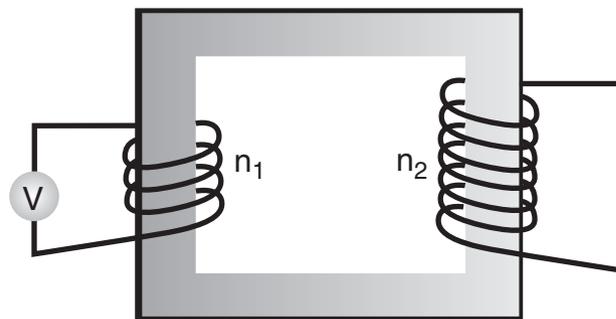


Figura 3.27 Transformador con n_1 vueltas en la bobina de entrada y n_2 vueltas en la bobina de salida.

La relación cuantitativa en un transformador es

$$\frac{\Delta V_{\text{entrada}}}{\text{Núm. de vueltas de entrada}} = \frac{fem_{\text{salida}}}{\text{Núm. de vueltas de salida}}$$

Por otro lado, en todo dispositivo (o en todo fenómeno), la energía debe conservarse, de manera que en este caso, cuando se aumenta el voltaje en la salida, ¿qué sucede con la energía? ¿De dónde sale la energía extra en la salida del transformador? Lo que sucede es que en el transformador se transfiere energía de una bobina a otra, y como la rapidez de transferencia de energía es la potencia, el principio de conservación de la energía se escribe como

$$\text{potencia de entrada} = \text{potencia de salida}$$

es decir:

$$(i\Delta V)_{\text{entrada}} = (i\Delta V)_{\text{salida}}$$

donde ΔV de la salida se refiere al voltaje inducido manifestado en la fem inducida.

Ejemplo

- Un transformador reductor dentro de un estéreo tiene 330 vueltas en la bobina primaria o devanado primario, y 25 vueltas en el secundario. El voltaje en el primario es de 120.0 V, y circulando una corriente de 0.850 A en funcionamiento, la bobina de salida o secundario alimenta al circuito electrónico. Determina a) la fem a la salida del secundario, b) la potencia eléctrica suministrada al circuito electrónico y c) la corriente en el secundario.

Solución:

La fem de salida se obtiene de la relación para el transformador:

$$a) \text{ fem}_{\text{salida}} = \Delta V_{\text{entrada}} \frac{N_{\text{salida}}}{N_{\text{entrada}}} = (120.0) \frac{25}{330} = 9.1 \text{ V}$$

b) Para calcular la potencia de entrada:

$P = i\Delta V = (0.850)(120.0) = 102 \text{ W}$, la cual es igual a la potencia de salida en el secundario, y

$$c) \text{ despejando la corriente en el secundario } i_{\text{salida}} = \frac{P_{\text{salida}}}{\text{fem}_{\text{entrada}}} = \frac{102}{9.1} = 11 \text{ A}$$



Problemas propuestos

85. En un transformador la fem de salida es _____ por la bobina de entrada.
86. Si el número de vueltas de la bobina de salida o secundaria es _____ que las de entrada, el voltaje a la salida baja. Si es _____, el voltaje de salida se eleva.
87. En un transformador, la _____ se transfiere de una bobina a otra y se cumple el principio de conservación de la energía.
88. El timbre eléctrico para una puerta de entrada opera a 10.0 V y con la finalidad de utilizarlo con el voltaje de 120 V se debe utilizar un transformador. ¿Qué tipo de transformador se requiere? ¿Cuántas vueltas necesita la bobina de salida?

Solución:

- 89.** De Europa te traen como regalo una cafetera eléctrica moderna que opera a 240.0 V y al funcionar requiere de 950.0 W. ¿Qué se requiere hacer para usarla en la línea de 120.0 V? ¿Cuántas vueltas requiere la bobina de salida? ¿Qué corriente requiere la cafetera al funcionar a 120.0 V?

Solución:

Resumen

Hemos encontrado una serie de analogías entre la interacción eléctrica y la interacción magnética; por ejemplo, las ecuaciones que las describen son semejantes, la carga y la corriente son análogas, así como las expresiones para las intensidades de los campos eléctrico y magnético. Existe un campo magnético en la región del espacio que rodea a un objeto cargado en movimiento; así, las fuerzas magnéticas se aplican por objetos cargados en movimiento a otros objetos cargados también en movimiento. En general estos objetos cargados son parte de una corriente o la forman. Entre alambres conductores que portan corrientes, la fuerza por unidad de longitud entre ellos es igual al producto del campo magnético de la corriente fuente por la corriente de prueba.

Un alambre conductor, enrollado para formar una bobina (muchas vueltas) o una espira (una vuelta), que conduce una corriente, se comporta como un dipolo eléctrico; es decir, se comporta como un imán.

Los imanes permanentes, tales como las agujas de las brújulas, se consideran un conjunto de corrientes microscópicas debidas al movimiento de los electrones, en los átomos o moléculas que forman dipolos microscópicos con los que decimos que se integran los dominios magnéticos en un material. Si tales dominios magnéticos están alineados, el material es un imán y, en caso contrario, un noimán. Algunos noimanes pueden magnetizarse para convertirse en imanes durante cierto tiempo. A estos imanes se les conoce como imanes transitorios.

El campo magnético puede representarse geoméricamente usando líneas de inducción, análogas a las líneas de fuerza para el campo eléctrico. En el caso de una corriente, las líneas de inducción forman circunferencias concéntricas centradas en la corriente y su dirección se encuentra con la regla de la mano derecha.

Se cree que el campo magnético de la tierra es producido por corrientes internas, de manera que el modelo comúnmente aceptado es el de un imán de barra, aunque el mecanismo exacto que produce el campo magnético terrestre no se conoce con precisión. Los asuntos a explicar son la declinación magnética, por la que los polos magnéticos y los polos geográficos no coinciden, y la manera en que la dirección del campo cambia y sigue cambiando al transcurrir el tiempo.

Cuando un alambre conductor se mueve dentro de un campo magnético se induce una fem de acuerdo con la descripción de la ley de Faraday. Este hecho ha dado lugar a aplicaciones tecnológicas como los generadores, motores y transformadores.

Bibliografía

- ARONS, A., *Teaching Introductory Physics*, John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1997.
- BLOOMFIELD, L. A., *How things work*, John Wiley and Sons, Inc., 2a. ed., Nueva York, 2001.
- CHIAVERINA, C., "The Simplest Motor?", *The Physics Teacher*, vol. 42, núm. 9, diciembre de 2004, p. 553.
- EFTHIMIOU, C. J. y Llewellyn, R. A., "Adding Resistances and Capacitances in Introductory Electricity", *The Physics Teacher*, vol. 43, núm. 6, septiembre de 2005, pp. 366-370.
- EHRlich, R., *Turning the World Inside Out and Other 174 Simple Physics Demonstrations*, Princeton University Press, Nueva Jersey, 1990.
- FEYNMAN, R., Leighton, R. B. y Sands, M., *Física*, vol. 1, Fondo Educativo Interamericano, México, 1971.
- GREENSLADE, T. B., "The Hydraulic Analogy for Electric Current", *The Physics Teacher*, vol. 41, núm. 8, noviembre de 2003, pp. 464-468.
- HEWITT, P. G., Suchocki, J. y Hewitt, L., *Conceptual Physical Science*, Addison Wesley Longman, 2a. ed., Boston, 1999.
- KANIM, S. y Thompson, J. R., "Magnetic Field Viewing Cards", *The Physics Teacher*, vol. 43, núm. 6, septiembre de 2005, pp. 355-359.
- McDERMOTT, L. C., Shaffer, P. S. y Physics Education Group, *Tutorials in Introductory Physics*, Prentice Hall, Nueva Jersey, 2002.
- MILLER, F., Dillon, T. J. y Smith, M. K., *Concepts in Physics*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., Orlando, 1969.
- SWARTZ, C. E. y Miner, T., *Teaching Introductory Physics*, Springer-Verlag Inc., Nueva York, 1998.

Apéndices



APÉNDICE 1

Termómetros

Cuando se habló de temperatura (sección 2.1) quizá se dio la impresión de que su medición y la definición de sus escalas de medida son cuestiones simples. Sin embargo, esto no es completamente así, ya que dos preguntas fundamentales, nada simples, son: ¿qué es un termómetro?, y ¿qué indican las lecturas en él? Para contestar estas preguntas se requiere describir cómo funciona un termómetro y, después, explicar la manera en que se calibran. Para ello tomaremos como modelo al termómetro simple de mercurio.

Todos hemos visto un termómetro simple. Consta de un tubo de vidrio cerrado por un extremo y, en el extremo opuesto, tiene un depósito denominado bulbo (figura A.1). El tubo interno, que es en realidad de dimensiones capilares —su radio es muy pequeño—, se encuentra conectado como un solo objeto al bulbo. A la vez, éste se encuentra lleno de mercurio —en el caso común que estamos analizando—, aunque podemos encontrar termómetros llenos con una diversidad de sustancias. A la sustancia que se utiliza en el termómetro se le conoce como *sustancia termométrica*.

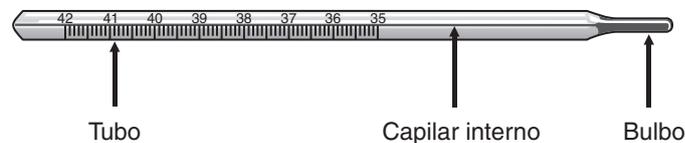


Figura A.1 Un termómetro simple.

Para que un termómetro funcione, la sustancia termométrica debe dilatarse y contraerse térmicamente (sección 2.4.3), de manera que si aumenta la temperatura de la sustancia termométrica (mercurio), aumente su volumen para pasar al capilar y ascender (si el termómetro está en posición vertical). La situación del mercurio dentro del capilar puede pensarse como una dilatación longitudinal.

En suma, el termómetro funciona de la siguiente manera: el bulbo se pone en contacto con el objeto al que se le desea medir la temperatura. Por un proceso de conducción, el calor se dirige del objeto más caliente al menos caliente —no necesariamente el termómetro siempre estará menos caliente que el otro cuerpo—. Después de un cierto tiempo, casi siempre dos o tres minutos, se llega al equilibrio térmico entre el objeto y termómetro, momento en que la sustancia termométrica habrá alcanzado su máxima dilatación (o contracción) y asciende (o desciende) dentro del capilar. Se retira el termómetro y se lee directamente la temperatura.

¿Y cómo sabemos que la lectura nos ofrece la temperatura correcta? Para ello describiremos la calibración de un termómetro. La calibración se lleva al cabo al realizar la operación anterior para dos objetos en un estado térmico único; esto es, en dos situaciones térmicas específicas. El objeto que se considera para la escala Celsius es el agua; y las situaciones específicas son: en ebullición y en congelación. La calibración se ejecuta en un laboratorio con condiciones controladas; en otras palabras, la presión atmosférica circundante siempre se mantiene a una atmósfera (o equivalentemente, a 1.013×10^5 Pa). Ésta es una condición muy importante. De hecho, es la condición por la cual, en 1947, se derogó la escala centígrada del Sistema Internacional de Unidades, y en su lugar se adoptó la escala Celsius.

Entonces, se pone agua en ebullición, se coloca el termómetro y, una vez alcanzado el equilibrio térmico, se marca hasta dónde llega el mercurio en su ascenso por el capilar. Des-

pués, se coloca el mismo termómetro en contacto con una mezcla de agua líquida y hielo, y se repite la misma operación. En seguida, se elige a la temperatura de ebullición como $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la temperatura de la mezcla de hielo y agua como $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura A.2). Finalmente, la distancia entre una y otra temperaturas de referencia se divide en cien partes iguales y cada una de ellas representa un grado Celsius ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

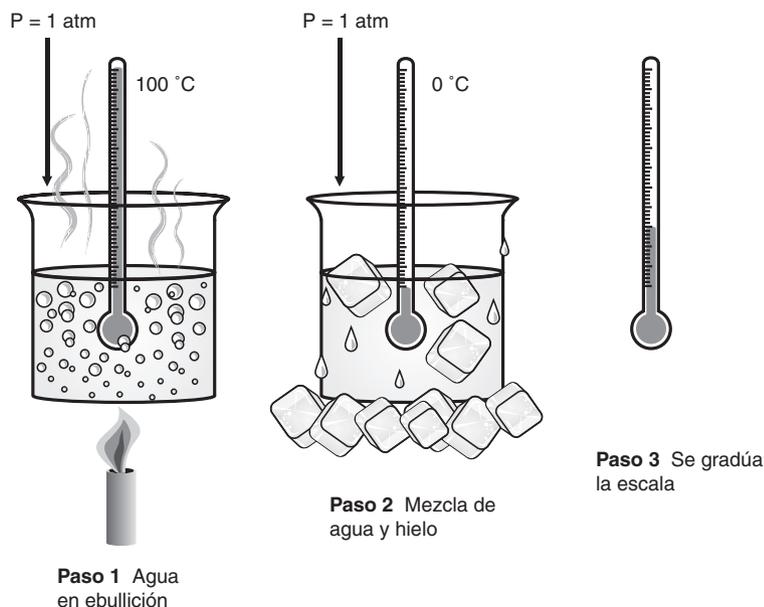


Figura A.2 Calibración de un termómetro simple.

De esta última discusión, retomemos la segunda pregunta: ¿qué indican las lecturas en el termómetro? Estrictamente hablando, indican cuánto se dilató el mercurio de acuerdo con una escala arbitraria calibrada del 0 al 100. Luego, como sabemos que la dilatación térmica es función de una propiedad que denominamos temperatura, lo que estamos midiendo es la temperatura de mercurio que, como se encontraba en equilibrio térmico con un objeto (en el caso de la calibración, el agua), nos indica también la temperatura del otro objeto.

APÉNDICE 2

Soluciones a problemas selectos

Unidad 1

1. b) Posición vertical.
3. La presión ejercida será $P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{(54)(10)}{(0,50 \times 10^{-2})^2} = 2,2 \times 10^7 \text{ Pa}$, si la superficie no soporta esta presión, el tacón se hunde.
5. c) Acostado, ya que aumenta el área de contacto en que se aplica nuestro peso.
7. Sea A el área de contacto con el suelo, al inicio $F_i = PA = (1,85 \times 10^5) A \text{ Pa}$, al final $F_f = 2,05 \times 10^5 A \text{ Pa}$, de donde $\frac{F_f}{F_i} = \frac{2,05 \times 10^5 A}{1,85 \times 10^5 A} = 1,11$ alrededor del 11%.
13. El volumen de los 5,00 kg de plata será: $V = \frac{m}{\rho_p} = \frac{5,00 \text{ kg}}{10\,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 4,76 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ igualando al volumen del disco y despejando R : $R = \sqrt{\frac{V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{4,76 \times 10^{-4}}{\pi(1,00 \times 10^{-2})}} = 0,123 \text{ m}$
14. Sea V_a , m_a y V_c , m_c el volumen y la masa del aire y concreto respectivamente, los totales son: $V_T = V_c + V_a = 0,0255 \text{ m}^3$; $m_T = m_c + m_a = \rho_c V_c + \rho_a V_a = 2200 V_c + 1,3 V_a = 32,0$, resolviendo simultáneamente tenemos $V_a = 0,011 \text{ m}^3$; igualando al volumen de una esfera, el radio es $R = 0,138 \text{ m}$.
17. b) En el antebrazo a la altura del corazón.
18. b) En la parte inferior por haber mayor presión.
19. $P = \rho gh = (1,025 \times 10^3)(10)(10\,000) = 1,025 \times 10^8 \text{ Pa}$, la presión en el fondo. La fuerza es:
b) $F = PA = (1,025 \times 10^8)\pi(11,0 \times 10^{-2}) = 3,9 \times 10^6 \text{ N}$. Comparando con el peso en c) $\frac{3,9 \times 10^6}{1,0 \times 10^6} = 3,9$ cerca de cuatro veces mayor que el peso.
25. Para un ascenso con rapidez constante la fuerza resultante debe ser cero. Por lo tanto: $F_0 = F_b = 6\,000 \text{ N}$. Despejando su radio del volumen de la esfera de aire desplazado: $R = \sqrt[3]{\frac{3F_b}{4\pi\rho_a g}} = \sqrt[3]{\frac{3(6\,000)}{4\pi(1,295)(10)}} = 4,80 \text{ m}$.
26. Sean V_h el volumen total del hielo, V_f el volumen del hielo sin hundir y V_d el hielo hundido en el agua, entonces, $V_h = V_f + V_d$. Su peso total será $F_0 = \rho_h V_h g$, pero se hunde solo el volumen desplazado. La fuerza boyante debe ser igual a su peso

de donde $F_0 = F_b = \rho_h(V_f + V_d)g = \rho_a V_d g$. Despejando, $V_f = \frac{(\rho - \rho_h)V_d}{\rho_h} = 0.121 V_d$.

Cerca del 12% del volumen hundido se encuentra sobre la superficie.

28. Calculamos el volumen mínimo desplazado para soportar el peso de las personas, la carga y el peso de la balsa. En total, $F_T = F_p + F_c + F_b = 6 m_p g + m_c g + \rho_m V_d g$. La fuerza de empuje es ; igualando las ecuaciones y despejando para el volumen desplazado: $6(75.0) + 250 + 555V_d = (1\ 000) V_d$; $V_d = 1.57\ m^3$, el volumen total de la madera. Usando el volumen por rama, $N_{iron} = \frac{1.57}{(3.50)\pi(8.0 \times 10^{-2})^2} = 23$ ramas mínimo.

29. $A_2 = 2A_1$ y $F_1 = 30.0\ N$; $F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 = \frac{2A_1}{A_1} F_1 = 2F_1 = 60.0\ N$.

34. La presión en la superficie es la atmosférica y la presión ejercida por la columna de agua debe ser igual también a la atmosférica para que en el fondo la presión absoluta sea dos veces la atmosférica. Entonces, calculamos la altura de dicha columna (profundidad):

$$P_m = \rho g h; \quad h = \frac{P_m}{\rho g} = \frac{1.013 \times 10^5}{(1\ 000)(10)} = 10.13\ m$$

38. b) Mercurio } Agua } Alcohol.

39. b) El automóvil es impulsado hacia el carril contrario al que circula.

40. La mayor rapidez del aire fuera del automóvil baja la presión con respecto a la interior y hace efecto de "vacío" jalando el humo hacia fuera.

43. El gasto a través del hidrante es: $Q = Av = \pi(8.0 \times 10^{-2})^2(3.1) = 6.2 \times 10^{-3}\ \frac{m^3}{s}$ y con la densidad del agua disponemos de $62\ \frac{kg}{s}$. Cuando se usan las dos mangueras

le corresponde a cada una $31\ \frac{kg}{s}$, o sean $0.031\ \frac{m^3}{s}$. La rapidez a la salida por su restricción es:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.031}{\pi(2.0 \times 10^{-2})^2} = 24\ \frac{m}{s}$$

Si se usa una sola manguera la rapidez no será la misma y deben fluir los $6.2 \times 10^{-3}\ \frac{m^3}{s}$; entonces, como el gasto es el doble para

la misma área, la rapidez debe ser el doble, $48\ \frac{m}{s}$.

Problemas complementarios

2. Si colocamos el ladrillo sobre la cara de 9.00 in por 3.50 in, su área es $31.5\ in^2$ que equivalen a $0.0203\ m^2$, el peso en newtons de un ladrillo es $3.95\ lb = 17.6\ N$, por lo tanto, un ladrillo ejerce una presión $P = \frac{F}{A} = \frac{17.6}{0.0203} = 867\ Pa$ usando análisis de dimensiones:

$$\frac{1\ ladrillo}{867\ Pa} \left[\frac{1.00 \times 10^5\ Pa}{atm\ ósfera} \right] = 115\ \frac{lad}{atm}$$

5. a) No, se trata de diferentes sustancias, tanto en la Tierra como en la Luna.
 b) La columna de mercurio, por tener mayor densidad.
 c) No, el peso de la columna es distinto en cada sitio astronómico.
 d) En la Tierra por ser mayor el peso de cada columna y mayor presión.
 e) Al peso de cada columna debido a la diferente aceleración gravitacional.
10. La masa total de la moneda está dada por las masas de plata y cobre. Con las densidades: $m_t = m_p + m_c = \rho_p V_p + \rho_c V_c = 115.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ (I). Del peso aparente en el agua podemos calcular el volumen que la moneda desplaza dentro del agua $W_a = F_0 - F_b$, de donde:
 $F_b = F_0 - W_a = mg - 1.043 = \rho V_d g = 0.1155(10) - 1.043 = 0.1120 \text{ N}$. Luego,
 V_d es: $V_d = \frac{F_b}{\rho g} = \frac{0.1120}{1000(10)} = 1.120 \times 10^{-5} \text{ m}^3$; además, $V_d = V_p + V_c = 1.120 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
 (II). Al resolver simultáneamente (I) y (II) obtenemos $V_c = 1.294 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ y $V_p = 9.906 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ que, por sus densidades respectivas, nos dan $m_p = 104.0 \text{ g}$ y $m_c = 11.50 \text{ g}$ que corresponden al 90.0 % plata y 10.0 % cobre.
14. Al aumentar la temperatura disminuye la tensión superficial.
15. Modificando la temperatura del lavado.
17. La diferencia de presiones del aire en el venturi la podemos considerar despreciable por su baja densidad y por el tamaño del dispositivo; por lo tanto, de la ecuación de Bernoulli tenemos: $\rho_1 v_1^2 = \rho_2 v_2^2$. De la definición de densidad: $m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2$. Como $V = Al, A_1 l_1^2 = A_2 l_2^2$, de donde $v_2 = \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} v_1 = \sqrt{\frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2}} v_1 = \sqrt{\frac{0.750^2}{0.155^2}} (0.79)^2 = 3.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
19. La rapidez a la salida es $v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{\pi(1.425)^2}{\pi(0.750)^2} (3.50) = 12.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Luego,
 $P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 160.0 \times 10^3 + \frac{1}{2} (0.850 \times 10^3) [(12.6)^2 - (3.50)^2] = 2.22 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Unidad 2

1. a) 39 °F, b) 176 °F, c) 14 °F, d) -148 °F, e) -18 °C, f) 38 °C, g) -36 °C, h) -136 °C
10. Con la arena es por conducción ya que estamos en contacto con ella; con el agua y el aire ambiental es por convección por tratarse de fluidos en contacto con nuestro cuerpo.
11. Convección.
19. $\Delta l = \alpha_{\text{ace}} l \Delta T = (12 \times 10^{-6})(1300)(22 - 3.0) = 0.3 \text{ pies}$.
21. $\Delta T = \frac{\Delta l}{\alpha l} = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{(29 \times 10^{-6})(1.000)} = 55 \text{ °C}$ y $\Delta T = T_f - T_i$, de donde: $T_f = \Delta T + T_i$
 $= 55 + 25 = 80 \text{ °C}$
23. El volumen V derramado es el correspondiente a la diferencia en las dilataciones del mercurio y el vidrio pyrex. Usando los datos de la tabla calculamos los aumentos:
 $\Delta V_{\text{mer}} = \beta_{\text{mer}} V \Delta T = (182 \times 10^{-6})(0.100)(35 - 20) = 2.73 \times 10^{-4} \text{ lt}$. Para el vidrio pyrex:
 $\Delta V_{\text{vid}} = \beta_{\text{vid}} V \Delta T = (10 \times 10^{-6})(0.100)(15) = 1.5 \times 10^{-5} \text{ lt}$ y el volumen derramado será:

$V = \Delta V_{mer} - \Delta V_{vid} = 2.73 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-5} = 2.6 \times 10^{-4} \text{ lt}$. Con la densidad del mercurio:

$$M_{mer} = (2.6 \times 10^{-4} \text{ lt}) \left[\frac{1\,000 \text{ cm}^3}{\text{lt}} \right] \left[13.6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] = 3.5 \text{ gr de mercurio.}$$

25. En este caso no interesa el cambio de volumen del tanque ya que sólo se pregunta por el cambio sufrido por la gasolina. Éste disminuye por un decremento de $30.0 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el viaje; así: $\Delta V = \beta_{gas} V \Delta T = (960 \times 10^{-6})(46\,000)(30.0) = 1\,325 \text{ lt}$. Entrega a la estación: $V = 46\,000 - 1\,325 = 44\,675 \text{ lt}$. Considerar el costo en pesos por litro.
27. Mientras hay hielo tenemos la seguridad de que está fría: a medida que el hielo absorbe energía, se funde y enfría la bebida. Pero cuando no hay hielo, la bebida comienza a ganar calor del medio. La fusión del hielo es un proceso de enfriamiento para la bebida y de calentamiento para el hielo.
34. La mayor temperatura del cuerpo humano y a su vez del traje hace que el calor fluya del astronauta al espacio y entre más oscuro mayor pérdida de calor, siendo el extremo el negro. Con el blanco se minimizan las pérdidas con respecto a cualquier otro color ya que es más importante el sustento de vida que la apariencia.
37. El recipiente de cobre gana calor tanto como el agua, de donde el total será la suma de ambos:

$$Q_{cub} = mc\Delta T = (200)(0.092)(75.0) = 1.38 \times 10^3 \text{ cal};$$

$$Q_{agua} = (1\,500)(1)(75.0) = 1.125 \times 10^5 \text{ cal};$$

$$Q_{total} = 1.38 \times 10^3 + 1.125 \times 10^5 = 1.14 \times 10^5 \text{ cal};$$

39. El calor que disipa la sangre es $Q = 2.40 \times 10^3 \text{ J} \left[\frac{\text{cal}}{4.186 \text{ J}} \right] = 573 \text{ J}$ y es removido

$$\text{por } 650 \text{ g. La disminución de temperatura producida es } \Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{573}{650(1)} = 0.9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Podemos decir que regresa al interior del cuerpo a $36 \text{ }^\circ\text{C}$.

Problemas complementarios

$$3. \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}} \left[\frac{4.186 \text{ J}}{\text{cal}} \right] \left[\frac{1\,000 \text{ gr}}{\text{kg}} \right] = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

9. Para el tanque: $\Delta V_{ace} = 3\alpha_{ace} V \Delta T = 3(12 \times 10^{-6}) \left[\pi(1.000)^2(5.000) \right] (30) = 0.017 \text{ m}^3$ para el alcohol metílico: $\Delta V_{alc} = \beta_{alce} V \Delta T = (1134 \times 10^{-6}) \left[\pi(1.000)^2(5.000) \right] (30) = 0.534 \text{ m}^3$. El volumen derramado es: $\Delta V = \Delta V_{alc} - \Delta V_{ace} = 0.534 - 0.017 = 0.517 \text{ m}^3$ o 517 lt .
14. En “tiempo de calor” la temperatura del medio ambiente es mayor que la del cuerpo por lo que fluye calor del ambiente hacia el cuerpo. La absorción de energía, de acuerdo con la radiación, es mayor para el color negro, de manera que usar prendas de este tono obviamente lo facilita.

Unidad 3

1. De la ley de Coulomb: $F_e = k \frac{qq'}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{(20 \times 10^{-9})(70 \times 10^{-9})}{(3.0 \times 10^{-2})^2} = 0.014 \text{ N}$, de atracción, es decir, dirigida hacia la carga con la que interacciona cada una.

2. c) $\frac{3}{4}F_0$

8. El número de Avogadro es 6.023×10^{23} partículas. Entonces, para este número de electrones: $Q = 6.023 \times 10^{23} \text{ elec} \left[\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1 \text{ elec}} \right] = 9.6 \times 10^4 \text{ C}$.

11. Diferente a la del electroscopio, no se pierde carga en el electroscopio; recuerda el principio de conservación de la carga.

15. Las esferas tienen inicialmente cargas $q_A = q_B$. Al tocar C a A, la mitad de la carga de A pasa a C. Tenemos $\frac{1}{2}q_A$ y $\frac{1}{2}q_C$. Enseguida, al tocar C a B la carga total de las dos es $q_B + \frac{1}{2}q_C$ que se reparte entre las dos esferas quedando cada una con . Entonces, al inicio: $F_0 = k \frac{q_A q_B}{r^2} = 100 \text{ mN}$, y después:

$$F = K \frac{\left[\frac{1}{2}q_A \right] \left[\frac{3}{4}q_B \right]}{r^2} = \frac{3}{8} k \frac{q_A q_B}{r^2} = F_0 = 37.5 \text{ mN}$$

19. $E = k \frac{q'}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(5.0 \times 10^{-9})}{(1.5)^2} = 20 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ radialmente hacia fuera.

21. $F_e = qE = (1.0)(140) = 140 \text{ N}$. Por ser negativa la carga de la Tierra, la fuerza sería de repulsión; se restaría de tu peso.

23. $F_e = qE = (1.0)(140) = 140 \text{ N}$ y por ser negativa la de la Tierra la fuerza sería de repulsión, se restaría de tu peso.

25. $W = q\Delta V = (1.6 \times 10^{-19})(20\ 000) = 3.2 \times 10^{-15} \text{ J}$

27. a) $F = qE = (1.6 \times 10^{-19})(1.50 \times 10^6) = 2.40 \times 10^{-13} \text{ N}$

b) $W = Fd = (2.40 \times 10^{-13})(0.500) = 1.20 \times 10^{-13} \text{ J}$

c) $\Delta VU_p = -W = -1.20 \times 10^{-13} \text{ J}$

d) $\Delta V = \frac{W}{q} = \frac{1.20 \times 10^{-13}}{1.60 \times 10^{-19}} = 7.50 \times 10^5 \text{ V}$

31. $\frac{V}{m} = \frac{J}{\text{C} \cdot m} = \frac{\text{N} \cdot m}{\text{C} \cdot m} = \frac{\text{N}}{\text{C}}$

32. $V = Ed = (3.0 \times 10^6)(1.10 \times 10^{-3}) = 3.3 \times 10^3 \text{ V}$

43. Para el cobre $R = \rho_c \frac{l}{A_c}$ y para el oro $R = \rho_o \frac{l}{A_o}$ donde $RA_c = \rho_c l$ y $RA_o = \rho_o l$.

Dividiendo una entre la otra: $\frac{A_o}{A_c} = \frac{\rho_o}{\rho_c} = \frac{2.27 \times 10^{-8}}{1.54 \times 10^{-8}} = 1.44$ de donde $A_o = 1.44A_c$.

45. El $kW-h$ es unidad de energía, ya que es potencia \times tiempo = trabajo.

47. $R = \frac{P}{i^2} = \frac{40}{3} = 120 \Omega$

49. $P = I^2 R = (8.60)^2(14.0) = 1.04 \times 10^5 \text{ W}$
53. Para 12.0V, en seco, $i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{12.0}{500,000} = 2.40 \times 10^{-5} \text{ A}$. En húmedo, $i = \frac{12.0}{100} = 0.12 \text{ A}$
 Para 120V: $i = \frac{120}{500,000} = 2.4 \times 10^{-4} \text{ A}$ y $i = \frac{120}{100} = 1.20 \text{ A}$. Es peligroso el voltaje alto y baja resistencia.
57. $\Delta V = (150 \times 10^{-3})(5.00 \times 10^4) = 7500 \text{ V}$
67. $R_{eq} = 267\Omega$, $i_1 = 0.300 \text{ A}$ y $i_2 = 0.150 \text{ A}$, $i_t = 0.450 \text{ A}$, $\Delta V = 120 \text{ V}$ en cada resistencia: $P_1 = 36 \text{ W}$, con $P_t = 54 \text{ W}$
75. $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_1 i_2}{r} \right] = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{(12.0)(12.0)}{(0.10 \times 10^{-2})} \right] = 2.9 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$ y es de repulsión.
83. $\epsilon = Blv = (0.800)(6.0)(1.60) = 7.7 \text{ V}$
84. $0.300 = (0.100)lv$; $lv = 3.00$ y con $B = \frac{fem}{lv} = \frac{1.50}{3.00} = 0.500 \text{ T}$
88. Se requiere un transformador de bajada, si N_1 son vueltas de entrada y N_2 vueltas de salida, entonces: $\frac{120}{N_1} = \frac{10.0}{N_2}$ obtenemos $\frac{N_1}{N_2} = \frac{120}{10.0} = 12.0$ de donde el número de vueltas a la entrada es 12 veces el número de vueltas a la salida.

Problemas complementarios

1. a) Si $q = q'$: $q = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}} = \sqrt{\frac{(0.240)(20.0 \times 10^{-2})^2}{9 \times 10^9}} = 1.03 \times 10^{-6} \text{ C}$
- b) Si $q' = 4q$, entonces $q = \sqrt{\frac{Fr^2}{4k}} = \sqrt{\frac{(0.240)(20.0 \times 10^{-2})^2}{4(9 \times 10^9)}} = 5.2 \times 10^{-7} \text{ C}$, donde $q' = 21 \times 10^{-7} \text{ C}$.
7. El único punto donde el campo es cero se encuentra entre las cargas. Sea x la distancia medida desde q_1 a este punto. Tenemos que el campo es cero sólo si $E_1 = E_2$ en magnitud pero de dirección opuesta; así, $k \frac{q_1}{x^2} = k \frac{q_2}{(3.00-x)^2}$: $\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(3.00-x)^2}$
- sacando raíz a ambos términos: $\frac{x}{(3.00-x)} = \sqrt{\frac{q_1}{q_2}}$; despejando x : $x = \frac{3.00 \sqrt{\frac{q_1}{q_2}}}{1 + \sqrt{\frac{q_1}{q_2}}}$ susti-
- tuyendo los valores obtenemos $x = 2.0 \text{ m}$ medidos desde q_1 .

$$11. W = \Delta K = \frac{1}{2} m(v_f^2 - v_i^2) = \frac{1}{2} (9.1 \times 10^{-31}) [(8.50 \times 10^6)^2 - (3.50 \times 10^6)^2] = 2.73 \times 10^{-17} \text{ J y}$$

$$\Delta V = \frac{W}{q} = \frac{2.73 \times 10^{-17}}{1.6 \times 10^{-19}} = 170 \text{ V}$$

$$17. V = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[\frac{800}{5.60} \right] = 2.86 \times 10^{-5} \text{ T, no es problema.}$$

$$20. v = \frac{fem}{Bl} = \frac{950}{(0.80)(10.0 \times 10^{-2})} = 1.2 \times 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

APÉNDICE 3

Numeralia física

Aceleración gravitacional sobre la superficie del sol: $2.7 \times 10^2 \frac{m}{s^2}$

Aceleración gravitacional media sobre la superficie de la Tierra: $9.81 \frac{m}{s^2}$

Edad de la Tierra (en 1996): $1.6 \times 10^{17} s$

Edad del universo (en 1996): $3.3 \times 10^{17} s$

Radio de Bohr del átomo de hidrógeno: $5.291770 \times 10^{-11} m$

Radio del asteroide que extinguió a los dinosaurios: $4 \times 10^3 m$

Radio del universo: $1 \times 10^{28} m$

La era Cenozoica comenzó hace: $2.2 \times 10^{15} s$

Diámetro de la Vía Láctea: $7.6 \times 10^{20} m$

Diámetro de un protón: $2 \times 10^{-15} m$

Distancia Tierra-Luna: $3.84 \times 10^8 m$

Distancia Tierra-Sol (media): $1.50 \times 10^{11} m$

Distancia a la galaxia de Andrómeda: $2.1 \times 10^{26} m$

Masa en reposo del electrón: $9.109534 \times 10^{-31} kg$

Masa de un protón: $1.672648 \times 10^{-27} kg$

Masa de la Tierra: $5.9763 \times 10^{24} kg$

Masa del sol: $1.99 \times 10^{30} kg$

Masa de la Vía Láctea: $4 \times 10^{41} kg$

Masa del universo: $1 \times 10^{53} kg$

Contenido energético de la cerveza: $1.8 \times 10^6 \frac{J}{kg}$

Contenido energético de la gasolina: $4.8 \times 10^7 \frac{J}{kg}$

Energía de la metabolización de una manzana: $4.6 \times 10^5 J$

Energía liberada en la explosión de Hiroshima: $2.1 \times 10^{14} J$

Rapidez de crecimiento del cabello: $3 \times 10^{-9} \frac{m}{s}$

Rapidez de la deriva continental: $1 \times 10^{-9} \frac{m}{s}$

Rapidez de escape de la influencia gravitacional de la Tierra: $1.1179 \times 10^4 \frac{m}{s}$

Inclinación del eje de la Tierra en su órbita: 2.345×10^1 grados

Número de nucleones en el universo: 1×10^{80}

Fuerza que aplica cada motor de un jet 747: $7.7 \times 10^5 N$

Temperatura del universo: $2.726 \times 10^0 K$

Temperatura en el centro de la Tierra: $4 \times 10^3 K$

Temperatura en la superficie del sol: $4.5 \times 10^3 K$

Algunos factores de conversión

Longitud

$$1 \text{ pulgada} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ pie} = 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ milla} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ m} = 39.37 \text{ pulg} = 3.281 \text{ pies} = 1.904 \text{ yardas}$$

$$1 \text{ año luz} = 9.461 \times 10^{15} \text{ m}$$

Área

$$1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ pulg}^2 = 1.08 \times 10^{-3} \text{ pies}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 = 10.76 \text{ ft}^2 = 1550 \text{ pulg}^2$$

Volumen

$$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^3 \text{ L} = 35.3 \text{ pies}^3 = 6.10 \times 10^4 \text{ pulg}^3 = 264 \text{ gal}$$

$$1 \text{ gal} = 3.785 \text{ L}$$

Ángulo

$$1 \text{ rad} = 57.3^\circ$$

$$45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad} \quad 180^\circ = \pi \text{ rad}$$

$$1 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = \frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ s}} = 0.1047 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Fuerza

$$1 \text{ N} = 0.225 \text{ lb} = 10^5 \text{ dinas} = 0.2248 \text{ lb}$$

$$1 \text{ dina} = 10^{-5} \text{ N} = 2.25 \times 10^{-6} \text{ lb}$$

Energía

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 0.7373 \text{ pie} \cdot \text{lb}$$

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$$

Potencia

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$$

Alfabeto griego

Alfa	A	α	Iota	I	ι	Ro	P	ρ
Beta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	T	τ
Delta	Δ	δ	Mu	M	μ	Upsilon	Y	υ
Epsilon	E	ϵ	Nu	N	ν	Phi	Φ	ϕ
Zeta	Z	ζ	Xi	Ξ	ξ	Chi	X	χ
Eta	H	η	Omicron	O	\omicron	Psi	Ψ	ψ
Theta	Θ	θ	Pi	Π	π	Omega	Ω	ω

Bibliografía

- BENKA, S. G. y Day C., "Everyday physics", *Physics Today*, vol.52, núm. 11, noviembre de 1999, p. 23.
- BRACIKOWSKI, D. B., *et.al.*, "Feeling the Physics of Linear Motion", *The Physics Teacher*, vol. 36, p. 242, abril de 1998.
- CANDERLE, L. H., "Extending the Analysis of One-Dimensional Motion", *The Physics Teacher*, vol. 37, p. 486, noviembre de 1999.
- EHRlich, R., *Turning the World Inside Out and other 174 simple physics demonstrations*, Princeton University Press, New Jersey, 1990.
- FEYNMAN, R., Leighton, R. B. y Sands, M., *Física, vol.1*, Fondo Educativo Interamericano, México, 1971.
- HEWITT, P. G., Suchocki, J. y Hewitt, L., *Conceptual Physical Science*, Addison Wesley Longsman, segunda edición, Estados Unidos, 1999.
- LEE, P., "Circular Motion", *The Physics Teacher*, vol. 33, p. 49, enero de 1995.
- McDERMOTT, L. C., "Research on Conceptual Understanding in Mechanics", *Physics Today*, Julio de 1984, pp. 2-10.
- McDERMOTT, L. C., Shaffer, P.S. y el Physics Education Group, *Tutorials in Introductory Physics*, Prentice Hall, Nueva Jersey, 2002.
- MOLINA, M. I., "More on Projectile Motion", *The Physics Teacher*, vol. 38, p. 90, febrero de 2000.
- PERELMÁN, Y. J., *Problemas y experimentos recreativos*, Mir, Moscú, 1975.
- ROSENQUIST, M. L. y McDermott, L. C., "A Conceptual Approach to Teaching Kinematics", *American Journal of Physics*, vol. 55, núm. 5, mayo de 1987, pp. 407-415.
- SAWICKI, M., "What's Wrong in the Nine Most Popular Texts", *The Physics Teacher*, vol. 34, p. 147, marzo de 1996.
- SARAFIAN, H., "On Projectile Motion", *The Physics Teacher*, vol. 37, p. 86, febrero de 1999.
- SUBRAMANIAN, P. R. *et. al.*, "The Grammar of Physics", *The Physics Teacher*, vol. 28, p. 174, 1990.
- SWARTZ, C. E. y Miner, T., *Teaching Introductory Physics*, Springer-Verlag Inc., Nueva York, 1998.
- TRIER, A., "Projectile motion: An Alternative Description", *The Physics Teacher*, vol. 31, p. 182, marzo de 1993.
- WEDEMEYER, B., "Centripetal Acceleration-A Simpler Derivation", *The Physics Teacher*, vol. 31, p.238, abril de 1993.
- WENHAM, E. J. (editor), *Nuevas tendencias en la enseñanza de la física*, vol. IV, Energía, UNESCO, 1985.

Notas

Notas

Notas

Notas