

Electricidad y Óptica

1



Electricidad y su naturaleza

1.1. Introducción	15
1.1.1 Importancia de la electricidad	19
1.2.2 Noción de circuito eléctrico	20
1.2. Electrostática	23
1.2.1. Electrización de los cuerpos	23
1.2.2. Naturaleza de la electricidad	28
1.2.3. Carga eléctrica.	34
1.2.4. Ley de Coulomb.	38
1.2.4.1 Unidad de carga eléctrica	41
1.2.5. Campo eléctrico	50
1.2.5.1. Intensidad de campo eléctrico	51
1.2.5.2. Intensidad de campo eléctrico de una partícula cargada	54
1.2.5.3. Líneas de campo eléctrico	57
1.2.6. Potencial y diferencia de potencial	62
1.2.6.1. Energía potencial eléctrica	62
1.2.6.2. Potencial eléctrico	66
1.2.6.3. Diferencia de potencial	66
1.2.7. Conductores y dieléctricos en un campo electrostático	69
1.2.7.1. Conductores en un campo electrostático	69
1.2.7.2. Aisladores en un campo electrostático	72
1.2.7.2.1. Dieléctricos polares	72
1.2.7.2.2. Dieléctricos no polares	73
1.2.8. Capacidad eléctrica y condensadores	75
1.2.9. Energía del campo eléctrico	81
1.3. Actividades de sistematización y consolidación	85
1.3.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	85
1.3.2. Conexión de conceptos e ideas	86
1.3.3. Crucigrama	87
1.3.4. Actividades de repaso	88
1.3.5. Ejercicios de repaso	91

2



Corriente eléctrica y circuitos

2.1. Corriente eléctrica	97
2.1.1. Naturaleza de la corriente eléctrica y condiciones para que exista	97
2.1.2. Efectos de la corriente eléctrica	103
2.1.3. Sentido de la corriente, corrientes directa y alterna	105
2.1.3.1. Corriente directa y corriente alterna	107
2.1.4. Magnitudes básicas en los circuitos eléctricos	108
2.1.4.1. Intensidad de corriente	108
2.1.4.2. Diferencia de potencial o voltaje	112
2.1.4.3. Potencia eléctrica	115
2.1.4.4. Fuerza electromotriz	121
2.2. Corriente eléctrica en diversos medios	123
2.2.1. Corriente eléctrica en los metales. Ley de Ohm	123
2.2.2. Corriente eléctrica en los electrolitos	130
2.2.3. Corriente eléctrica en los gases	135
2.2.4. Corriente eléctrica en los semiconductores	137
2.3. Funcionamiento de circuitos eléctricos simples	145
2.3.1. Conexiones en serie y en paralelo	145
2.3.2. Dispositivos de control	151
2.3.3. Acoplamiento de circuitos eléctricos simples	154
2.3.4. Medición y ahorro de la energía eléctrica	155
2.4. Actividades de sistematización y consolidación	158
2.4.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	158
2.4.2. Conexión de conceptos e ideas	159
2.4.3. Crucigrama	160
2.4.4. Actividades de repaso	161
2.4.5. Ejercicios de repaso	163

3



Naturaleza y propagación de la luz

3.1. Introducción	169
3.2. Naturaleza de la luz	170
3.3. Propagación de la luz	177
3.4. Velocidad de la luz	181
3.5. Actividades de sistematización y consolidación	186
3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	186
3.5.2. Conexión de conceptos e ideas	187
3.5.3. Crucigrama	188
3.5.4. Actividades de repaso	189
3.5.5. Ejercicios de repaso	191

4



Óptica geométrica

4.1. Reflexión de la luz	195
4.1.1. Leyes de la reflexión	197
4.1.2. Imágenes formadas mediante un espejo plano	199
4.2. Refracción de la luz	201
4.2.1. Leyes de la refracción	202
4.2.2. Imágenes formadas mediante refracción de la luz	206
4.2.3. Reflexión total interna	207
4.3. Lentes y espejos esféricos	209
4.3.1. Tipos de lentes y espejos esféricos	210
4.3.2. Rayos característicos en lentes y espejos esféricos	212
4.4. Formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos	215
4.4.1. Formación de imágenes mediante lentes convergentes	216
4.4.1.1. La cámara fotográfica	216
4.4.1.2. El ojo humano	219
4.4.1.3. La lupa	223
4.4.1.4. El microscopio óptico	227
4.4.1.5. El telescopio refractor	229
4.4.2. Formación de imágenes por medio de espejos cóncavos	234
4.4.2.1. El espejo de aumento	234
4.4.2.2. El Telescopio reflector	236
4.5. Actividades de sistematización y consolidación	240
4.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo	240
4.5.2. Conexión de conceptos e ideas	241
4.5.3. Crucigrama	242
4.5.4. Actividades de repaso	243
4.5.5. Ejercicios de repaso	246

5



Actividades prácticas

5.1. Actividades prácticas para la casa o el aula	251
5.1.1. Electricidad y su naturaleza	251
5.1.2. Corriente eléctrica y circuitos	253
5.1.3. Naturaleza y propagación de la luz	254
5.1.4. Óptica geométrica	259
5.2. Prácticas de laboratorio	264
5.2.1. Característica voltampérica de un resistor. Ley de Ohm	265
5.2.2. Característica voltampérica del filamento de un bombillo	267
5.2.3. Medición de la fem y la resistencia interna de una fuente de energía eléctrica	269
5.2.4. Medición de la carga del electrón	273
5.2.5. Conexión de conductores en serie y en paralelo. Acoplamiento de circuitos simples	276
5.2.6. Propagación de la luz	280
5.2.7. Segunda ley de la refracción	283
5.2.8. Formación de imágenes mediante una lente convergente	286

Presentación

A estudiantes y profesores.

El presente libro forma parte de los materiales curriculares preparados para apoyar la introducción del Plan 2009 en el bachillerato de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Está dedicado a dos de las ramas básicas de la física, la Electricidad y la Óptica. Durante su estudio, los estudiantes no solo reafirman y enriquecen conceptos y habilidades desarrollados en asignaturas precedentes, sino que amplían su visión del mundo. En particular, se familiarizan con una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, se relacionan con el concepto de campo, explican diversos fenómenos del mundo que los rodea, analizan el principio físico básico del funcionamiento de numerosos dispositivos y equipos utilizados en la tecnología y la vida diaria, así como, con la naturaleza electromagnética de la luz y la idea de que puede tener tanto un comportamiento ondulatorio como corpuscular; explican numerosos fenómenos del mundo que los rodea; estudian el principio óptico del funcionamiento del ojo humano y de dispositivos de gran utilidad, como la fibra óptica, el microscopio y el telescopio.

De este modo, Electricidad y Óptica contribuye a ampliar la cultura general de los estudiantes, al tiempo que los prepara para continuar carreras universitarias de diversos perfiles.

El enfoque didáctico del libro es consecuente con el empeño de la Universidad Autónoma de Sinaloa de reestructurar el currículo de bachillerato en base a competencias. El propósito es que los alumnos alcancen un nivel de integración de conocimientos, procedimientos, actitudes y valores, que les permita desempeñarse eficazmente en la vida social y en sus estudios futuros. Esto requiere que a lo largo del curso, realicen una serie de actividades especialmente concebidas para ello. Por eso, acompañando al texto del libro, se ha incluido un gran número de preguntas, actividades a realizar y ejercicios resueltos. Luego, al final de cada capítulo, aparecen otras actividades que complementan a las anteriores y ayudan a consolidar y sistematizar lo estudiado. Se ha previsto además un apartado dedicado a actividades prácticas, el cual debe facilitar la labor de los maestros en esa

dirección, y ayudar así a rescatar un aspecto esencial de la formación de los alumnos, lamentablemente relegado en los últimos años. La idea central es que el libro sea, más allá de un libro de texto, un material de trabajo, pues solo reflexionando profundamente sobre lo leído, planteándose interrogantes y realizando numerosas actividades teóricas y prácticas alrededor del material, es decir, trabajando conscientemente, podrán los alumnos adquirir las competencias que se esperan.

Por último, nos parece necesario subrayar, que realizar con efectividad un enfoque del proceso de enseñanza-aprendizaje dirigido a la formación de competencias, no será posible si dicho proceso no es acompañado por un sistema de evaluación acorde con las competencias declaradas y las actividades desarrolladas.

Los autores

1 ELECTRICIDAD Y SU NATURALEZA





1.1. Introducción

Como ya sabes, la Física estudia **sistemas** y **cambios fundamentales**, que están en la base de sistemas y cambios más complejos, considerados por diversas ramas de la ciencia y la tecnología. Durante el estudio de la **Mecánica** examinaste uno de esos cambios, el **movimiento mecánico**. En este curso centraremos la atención en otra importante parte de la Física, denominada **Electromagnetismo**. Como sugiere este término, se trata de una rama que examina los fenómenos eléctricos y magnéticos y la vinculación entre ellos.

Por ahora pudieras decirlo así, pero tendrás una imagen más clara cuando estudiemos las características de esta interacción y algunos de los fenómenos que origina.

Entonces puede decirse que el Electromagnetismo es la rama de la ciencia que estudia aquellos fenómenos originados por la interacción electromagnética.



Los fenómenos estudiados por el Electromagnetismo son originados por la **interacción electromagnética**. Por su relevancia en la vida de los seres humanos, ésta ocupa un lugar destacado entre las cuatro interacciones fundamentales consideradas por la Física: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y débil.

Las interacciones fuerte y débil son las responsables de fenómenos que ocurren a escalas muy pequeñas, actúan solo a distancias inferiores a 10^{-15} m. La gravitatoria determina la estructura de sistemas, y procesos, a escala astronómicas; para nosotros tiene particular interés la interacción gravitatoria entre la Tierra y los cuerpos en su superficie. Por su parte, la interacción electromagnética es la responsable de la integridad de átomos, moléculas y de todos los cuerpos con los cuales nos relacionamos.

Con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas con que tenemos que ver en la vida diaria y la ingeniería —la fuerza ejercida por nuestros músculos, las fuerzas de rozamiento y elástica, las tensiones en cuerdas y alambres— son manifestaciones de la interacción electromagnética (Fig. 1.1). Ella también hace posible la visión,

ya que la luz es un fenómeno electromagnético. Incluso la vida misma sería imposible sin su acción. Como han mostrado los vuelos cósmicos (Fig. 1.2), los seres vivos, entre ellos los humanos, pueden pasar largos períodos sin estar sometidos a la acción gravitatoria, sin embargo, si por solo un instante desapareciera la interacción electromagnética, cesaría la vida.



Fig. 1.1. Con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas en la situación de la figura tiene un origen electromagnético: la acción de la persona y la maleta sobre el piso y la de éste sobre ellos, la tensión de la cuerda, la interacción de ésta con la maleta y la mano de la persona. Por supuesto, la integridad como cuerpos, tanto de la maleta como de la persona, también se debe a la interacción electromagnética.

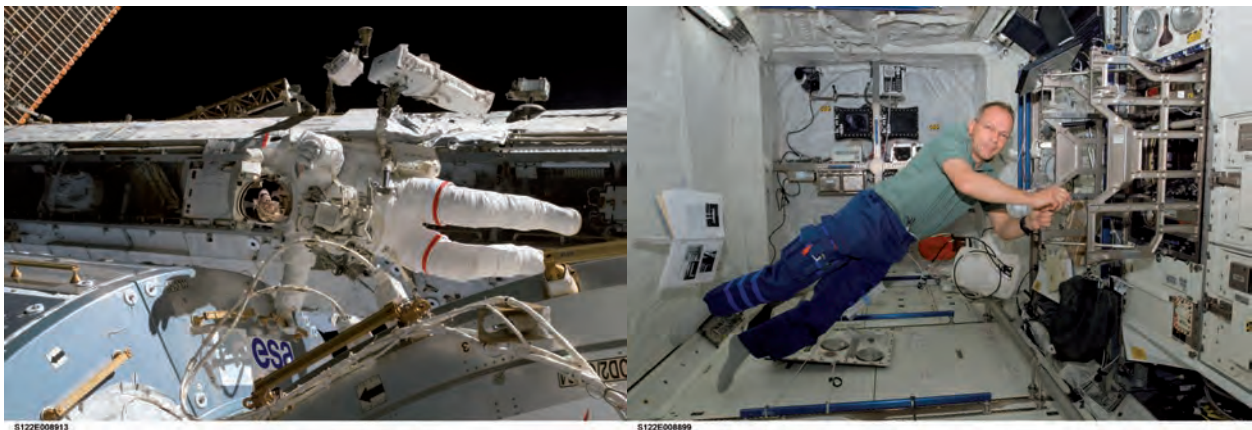


Fig. 1.2. Los seres vivos, entre ellos los humanos, pueden pasar largos períodos sin estar sometidos a la interacción gravitatoria, pero si por solo un instante desapareciera la interacción electromagnética, cesaría la vida.



Explica con tus propias palabras por qué en el texto se dice que con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas con que tenemos que ver habitualmente son manifestaciones de la interacción electromagnética.

Entre los sistemas en que los fenómenos electromagnéticos resultan esenciales están no solo los naturales. Después de construirse los primeros generadores de electricidad, especialmente las centrales eléctricas en la década de 1880, comenzaron a diseñarse y crearse ininidad de dispositivos y equipos cuyo funcionamiento se basa en los fenómenos electromagnéticos. Comparada con la historia de la humanidad, la historia de estos desarrollos tecnológicos es muy corta, data de apenas dos siglos, pero el impacto que han tenido en nuestro modo de vida y en el desarrollo de la ciencia y la tecnología ha sido colosal. Para percatarnos de esto, basta pensar qué sería de nuestra actividad diaria y en general de la actividad de la sociedad, si de pronto desapareciese la posibilidad de utilizar la electricidad. Por otra parte, se ha llegado a afirmar que la ciencia y la tecnología avanzaron más durante el pasado siglo que en todo su desarrollo anterior, e indudablemente esto fue posible, en gran medida, gracias a los descubrimientos e invenciones relacionados con el Electromagnetismo.

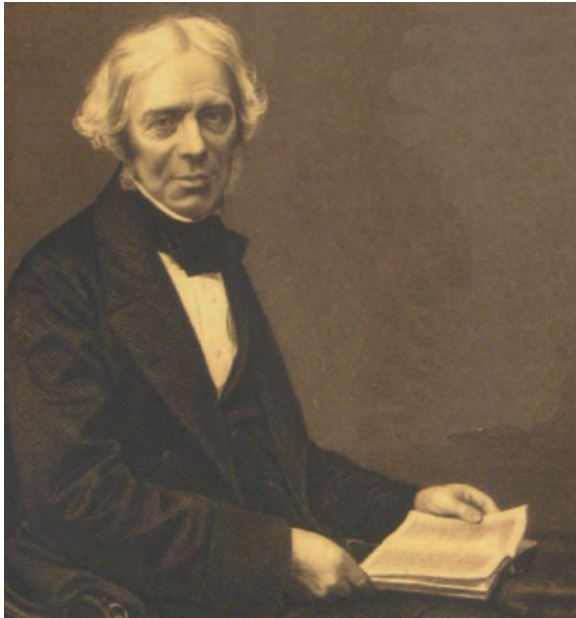


Relaciona sistemas, naturales y creados por el hombre, en que los fenómenos electromagnéticos son determinantes.





Al establecimiento del Electromagnetismo como rama de la ciencia contribuyó una larga cadena de descubrimientos e investigaciones, que comenzó con el simple hallazgo realizado en la antigüedad de que al frotar ámbar éste atraía objetos muy ligeros, y culminó en el siglo XIX con la predicción de la existencia de las ondas electromagnéticas y la generación de ellas en un laboratorio. Fueron muchos los protagonistas de esta historia, pero entre ellos sobresalen Michael Faraday y James C. Maxwell. Las “ecuaciones de Maxwell” desempeñan un papel similar en el Electromagnetismo, que las “Leyes de Newton” en la Mecánica clásica. Con ellas trabajarás de modo formal en la universidad, pues requieren conocimientos de Matemática Superior.



Michael Faraday (1791-1867). Físico y químico británico, introdujo las nociones de campo eléctrico y campo magnético y formuló la ley de inducción electromagnética, fundamento de los generadores y de los transformadores, también halló las leyes de la electrólisis.



James C. Maxwell (1831-1879). Físico británico, introdujo en la Física la interpretación estadística de los fenómenos, la que aplicó al estudio de los gases. Sintetizó las leyes fundamentales del Electromagnetismo en cuatro ecuaciones que en su honor hoy llevan su nombre.

En esta unidad comenzaremos examinando la electricidad, su importancia y naturaleza. En las siguientes abordaremos la corriente eléctrica y el funcionamiento de algunos circuitos simples.



1.1.1. Importancia de la electricidad

El verdadero desarrollo de la Electricidad tuvo lugar a partir del año 1800, después que el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) inventara la primera **pila eléctrica**. Desde entonces y hasta nuestros días, década tras décadas se han realizado importantes invenciones vinculadas al Electromagnetismo, que como ya señalamos, han cambiado el modo de vida de los seres humanos. Así, en la década del 70 del siglo XIX se fabricaron las primeras lámparas incandescentes y en los 80 empezaron a utilizarse pequeñas centrales eléctricas para la iluminación. La radio, la televisión, las computadoras e Internet, que han representado hitos en el desarrollo de las comunicaciones, fueron creadas a lo largo del siglo XX. El análisis de la tabla 1.1 te permite recorrer las fechas de algunas importantes invenciones vinculadas al Electromagnetismo. Todas ellas basan su funcionamiento en la **generación y utilización de electricidad**.

Vincula las fechas de las invenciones relacionadas en la tabla 1.1, con la época en que tuvieron lugar importantes hechos de la historia universal y de México.

Indagacuándocomenzaron a utilizarse en México: a) el teléfono, b) las primeras lámparas de filamento incandescente, c) el radio, d) la televisión.

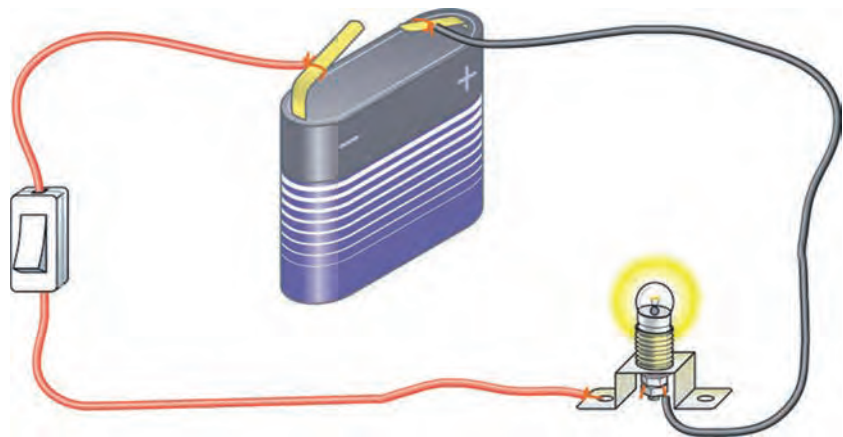


Tabla 1.1. Algunas invenciones vinculadas a la electricidad.

Pila eléctrica, 1800	Primer servicio público de televisión, 1936
Arco eléctrico, 1801 (comercializado en 1858)	Primera computadora digital electrónica, 1945
Motor eléctrico efectivo, 1829	Horno microonda, 1945-1949
Timbre eléctrico, 1831	Transistor, 1947
Primer telégrafo de trenes, 1837	Fotocopiadora, 1948
Dínamo, 1855	Célula o pila solar, 1954
Altavoz y micrófono, 1875	Mando a distancia, 1956
Teléfono, 1876	"Mouse" para computadora, 1968 (Se comercializó en 1983)
Lámpara incandescente efectiva, 1879 (40 h de duración)	Primera transmisión televisiva vía satélite, 1968
Primeras centrales eléctricas, década de 1880 (12 kW)	Microprocesador, 1971
Generador eléctrico eólico, 1891	Pantallas de cristal líquido, década de 1970
Telegrafía inalámbrica, 1895	Videos domésticos, década de 1970
Acondicionador de aire, 1902	Computadora personal, 1975
Secador de pelo eléctrico, 1905	Impresora láser, 1977
Comunicación de la voz humana a través de la radio, 1906	Amplio uso del Fax, 1980 (su uso se inició en 1956)
Primera transmisión regular de radio, 1920	Teléfono móvil, 1983
Guitarra eléctrica, 1932	Redes locales de computadoras en universidades y corporaciones, década de 1980
Lámpara fluorescente, 1933	Interconexión de redes locales de computadoras entre sí (Internet), finales de 1980
Radar, 1935	Correo electrónico, hacia 1990

1.2.2. Noción de circuito eléctrico

Todas las instalaciones eléctricas, desde una tan simple como la mostrada en la figura 1.3, hasta otras más complejas, como las requeridas para poner a funcionar los desarrollos tecnológicos relacionados en la tabla 1.1, o cualquier otro equipo eléctrico utilizado en la vida cotidiana, están formadas por **sistemas de dispositivos conectados entre sí**. Tales sistemas se denominan **circuitos eléctricos**.



En el circuito eléctrico de la figura 1.3, identifica los cuatro elementos básicos de los circuitos.

Fig. 1.3. Circuito eléctrico formado por una pila, un bombillito y un interruptor, conectados mediante cables.

Un **circuito eléctrico** es un conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada. En su funcionamiento intervienen cuatro elementos básicos: 1) generador o fuente de electricidad (“entrada”), 2) conductores y otros dispositivos para la transmisión de la energía eléctrica, 3) dispositivos de control y 4) receptores o consumidores (“salida”).

Argumenta por qué los circuitos eléctricos pueden considerarse sistemas.



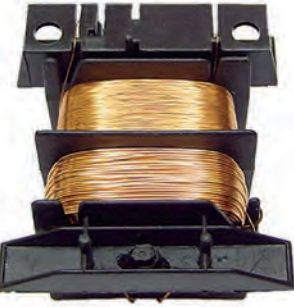
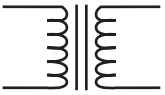


En la tabla 1.2 se muestran los símbolos con que habitualmente se representan algunos dispositivos utilizados en los circuitos eléctricos.

Tabla 1.2. Símbolos de algunos dispositivos eléctricos.

Dispositivo	Ejemplo	Símbolo
Fuente de electricidad		
Interruptor		
Fusible		
Bombillo		
Timbre eléctrico		



Resistor		
Motor		
Transformador		
Condensador o Capacitor		



Utilizando los símbolos de la tabla 1.2, dibuja un esquema del circuito eléctrico de la figura 1.3.

Explica desde el punto de vista de la energía cuál es la función que realizan las fuentes y los receptores en un circuito eléctrico.

En el funcionamiento del circuito de la figura 1.3 ¿cuáles pudieran considerarse la "entrada", y la "salida" del sistema?



Hemos subrayado la importancia que ha tenido la electricidad para los seres humanos y el hecho de que para su utilización se requiere de **circuitos eléctricos**. En los primeros dos capítulos del libro profundizaremos en cuestiones que nos permitirán comprender qué es la electricidad y cómo funcionan los circuitos eléctricos, en particular, intentaremos responder preguntas como las siguientes:

¿En qué consiste la electricidad? ¿Cómo se genera? ¿Cómo funcionan los circuitos eléctricos y algunos de los dispositivos que en ellos se utilizan? ¿Será posible emplear algunos pocos conceptos para describir el funcionamiento de los circuitos, pese a la inmensa variedad de ellos?

1.2. Electrostática

Comenzaremos por responder la primera pregunta formulada, *¿qué es la electricidad?* Ello te relacionará con interesantes fenómenos y aplicaciones de la electricidad.

1.2.1. Electrización de los cuerpos

Ya los antiguos griegos advirtieron –600 años antes de nuestra era– que al frotar con piel un trozo de cierta resina fósil que llamaban **elektrón** (actualmente denominada **ámbar**), adquiría la **propiedad de atraer pedazos ligeros de otros materiales**, como por ejemplo, pequeñas pajas, o plumas de aves. Más de 2 000 años después, en el siglo XVI, el físico y médico inglés William Gilbert (1544-1603) encontró que otros muchos materiales también tienen esa propiedad, por lo que los denominó **eléctricos**, es decir, semejantes al **elektrón** (al ámbar). Fue de ese modo que la palabra **electricidad** se introdujo en el lenguaje de la ciencia.

De los cuerpos que al ser frotados adquieren la propiedad de atraer a otros, comúnmente se dice que están **electrizados**, o que se han **cargado eléctricamente**.



William Gilbert (1544-1603), físico y médico inglés conocido sobre todo por sus experimentos originales sobre la naturaleza de la electricidad y el magnetismo.

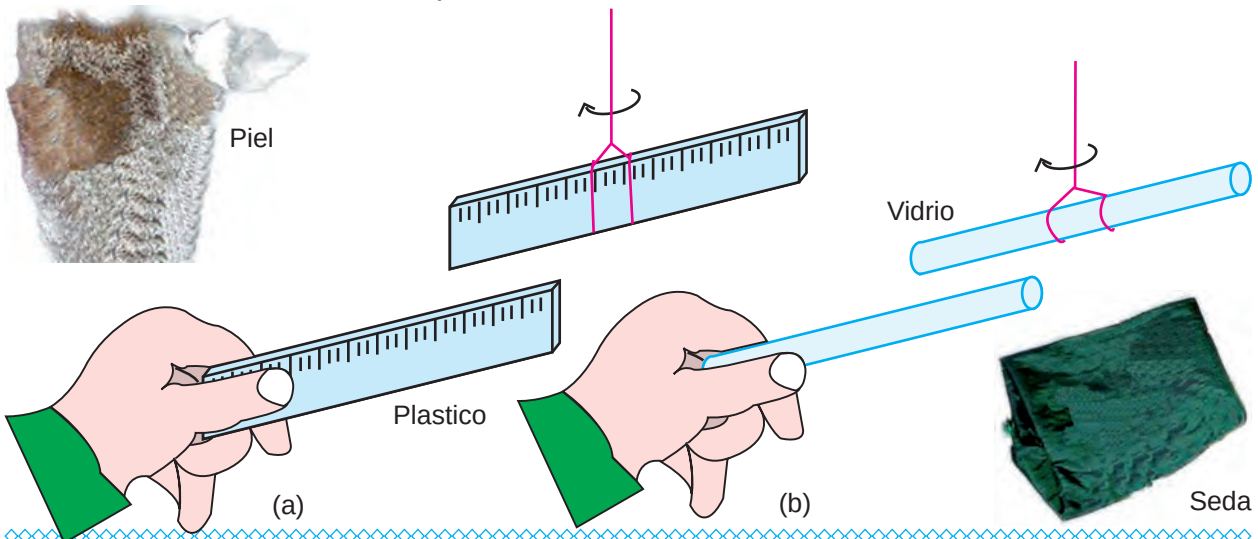


Frota con papel una regla plástica (o un bolígrafo) y acércalo a pequeños pedacitos de papel. Describe lo observado.



¿Será unilateral la acción de un cuerpo electrizado sobre otro, o consistirá en una acción mutua? Argumenta tu respuesta. Intenta comprobarla.

En el siglo XVIII los experimentadores descubrieron que existen **dos tipos de electricidad**. Así, dos reglas plásticas frotadas con piel se **repelen** entre sí (Fig. 1.4a), y lo mismo ocurre con dos varillas de vidrio frotadas con seda (Fig. 1.4b), sin embargo, al aproximar entre ellas una regla plástica y una varilla de vidrio previamente frotadas (Fig. 1.4c), no se repelen sino que se **atraen**. Esto pone de manifiesto que el plástico y el vidrio adquieren diferentes tipos de electricidad.



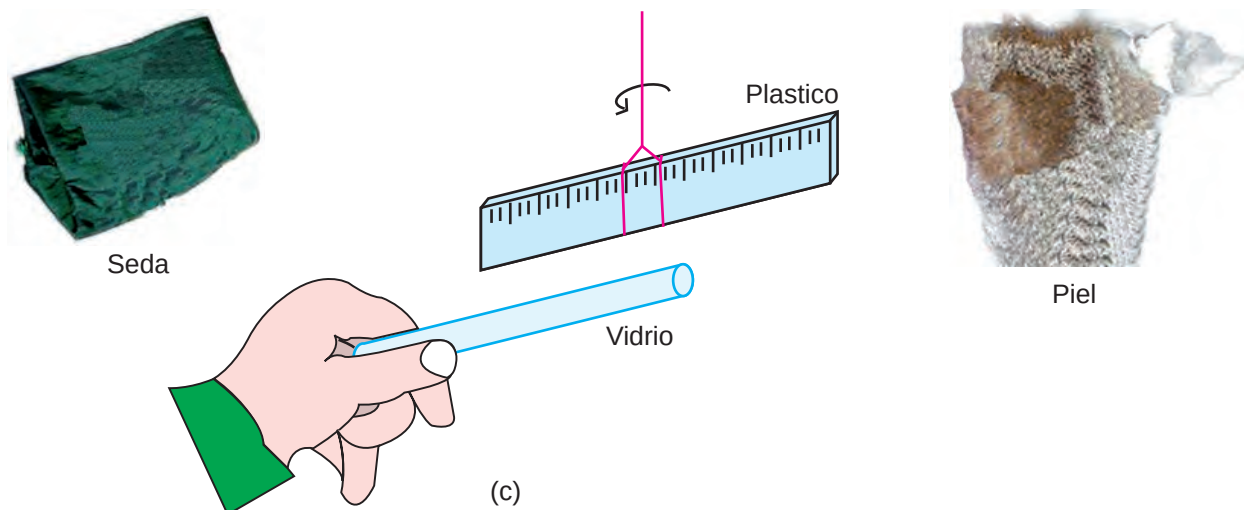


Fig. 1.4. (a) Dos reglas plásticas frotadas con piel se repelen entre sí, (b) dos varillas de vidrio frotadas con seda también se repelen entre ellas, (c) pero la regla plástica y la varilla de vidrio previamente frotadas, se atraen, lo cual muestra que adquieren distinto tipo de electricidad.

Convencionalmente, la electricidad que es como la adquirida por el vidrio al ser frotado se llama **positiva (+)** y la que es como la de las resinas o plásticos, **negativa (-)**.

¿Y no pudiera haberse llamado positiva a la electricidad adquirida por el plástico y negativa a la adquirida por el vidrio?

Por supuesto que sí, denominar una positiva y otra negativa es convencional, de modo similar que elegir un sentido de movimiento positivo y el contrario negativo.

Los cuerpos electrizados con el mismo tipo de electricidad (de igual signo) se **repelen** y los electrizados con diferente tipo (diferentes signos), se **atraen**.

Las experiencias anteriores evidencian que **la fuerza de interacción entre dos cuerpos electrizados, depende de la distancia entre ellos**. Mientras mayor sea dicha distancia, menor será dicha fuerza.





Señala las similitudes y diferencias que encuentres entre la fuerza gravitatoria y la fuerza eléctrica.



Intenta electrizar, frotándolos con papel u otros materiales, un lápiz o un pedazo de metal. ¿Es posible?

Probablemente te preguntarás por qué unos cuerpos se electrizan al ser frotados y otros no, en particular, ¿por qué es tan fácil electrizar una regla plástica y, sin embargo, parece imposible electrizar una varilla metálica?

En realidad cualquier cuerpo puede, en principio, ser electrizado mediante frotamiento, lo que sucede es que unos materiales **conducen la electricidad** mejor que otros. Así, los plásticos habituales la conducen muy mal, el cuerpo humano bastante bien y los metales muy bien. Por eso es que podemos electrizar un cuerpo plástico que sostenemos con la mano, mientras que uno metálico no. La electricidad producida al frotar la varilla metálica escapa inmediatamente de ella a través de nuestra mano.

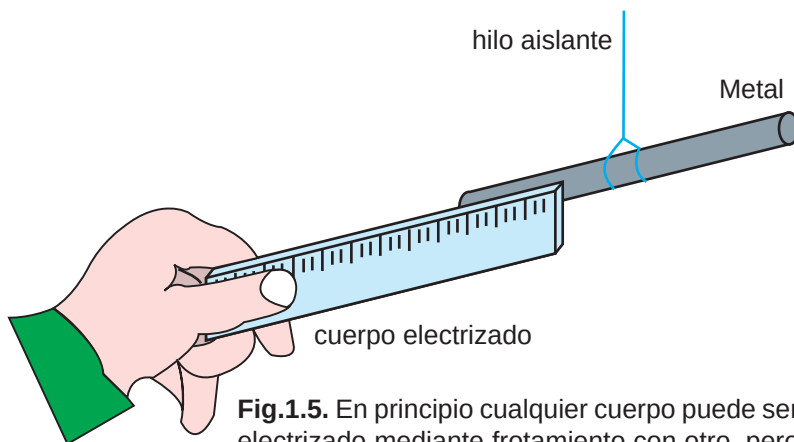


Fig.1.5. En principio cualquier cuerpo puede ser electrizado mediante frotamiento con otro, pero para ello, los que conducen bien la electricidad deben ser aislados.

Sin embargo, es posible electrizar una varilla metálica utilizando un mango aislador para sostenerla mientras se frota, o suspendiéndola de un hilo aislante y después rozándola con un cuerpo previamente electrizado (Fig. 1.5).



Cuando un cuerpo electrizado se aproxima a otro, a veces se producen chispas antes de tocarlo. El propio Newton, luego de observar tales chispas escribió: “La chispa me recordó un relámpago en pequeñas, muy pequeñas dimensiones”. En 1752, Benjamin Franklin, mediante un experimento sumamente peligroso, comprobó que, en efecto, el rayo tiene una naturaleza eléctrica. Elevó un papalote en un día de tormenta y logró transmitir a través de él electricidad de las nubes, provocando chispas y electrizando un cuerpo.



Indaga sobre los experimentos realizados por Benjamin Franklin con el propósito de confirmar la naturaleza eléctrica del rayo.

La electrización de los cuerpos es tomada en cuenta unas veces para defendernos de ella y otras para aprovecharla en el diseño de ciertos desarrollos tecnológicos. El pararrayos, por ejemplo, nos protege de las descargas eléctricas atmosféricas originadas por la electrización de las nubes. En las fábricas textiles se hace necesario tomar medidas contra la electrización de los hilos, que con el roce se electrizan enredándose y acumulando polvo.

Por su parte, cierta tecnología de recolección de hollín en las chimeneas, la dirección del movimiento de las pequeñísimas gotitas de tinta en una impresora de chorro y el fotocopiado, son ejemplos en que el fenómeno de la electrización ha sido aprovechado por el hombre. Durante el fotocopiado, en la superficie de un rodillo, mientras gira, se va creando una “imagen”, formada por electricidad positiva, de las letras y figuras que se copiarán. Esta “imagen” atrae finas partículas de “toner” cargadas negativamente. A





Indaga en alguna enciclopedia sobre las aplicaciones de la electrización de los cuerpos.



continuación, la hoja de papel, también electrizada, atrae hacia sí a las partículas que han formado letras y figuras en el rodillo. Finalmente, las partículas de polvo, ya en el papel, se funden mediante elevación de la temperatura, con lo cual resulta la impresión.

En algunos recipientes de comida preparada se usa una fina cubierta de plástico que se adhiere al recipiente sin pegamento alguno. ¿Cómo se explica esto?



Los experimentos y hechos analizados anteriormente ponen de manifiesto que **la electricidad se transmite** de unos cuerpos a otros, o a través de ellos, pese a que no ocurre cambio visible alguno, *¿qué es entonces lo que se transmite de un cuerpo a otro? ¿cuál es la naturaleza de la electricidad?*

1.2.2. Naturaleza de la electricidad

En el siglo XVIII se plantearon dos hipótesis básicas para explicar la electrización de los cuerpos. Una consideraba que a cada uno de los dos tipos de electricidad que hemos mencionado, positiva y negativa, correspondía **un fluido**. La otra afirmaba que el fluido es uno solo, de electricidad positiva, y que los materiales en sí mismos tienen electricidad negativa. De acuerdo con la primera hipótesis, la electrización de los cuerpos se explicaba por el exceso en ellos de alguno de los dos fluidos y, de acuerdo con la segunda, por el exceso o defecto del fluido positivo. En



ambos casos se consideraba que los fluidos eran continuos, en aquella época se desconocía que los cuerpos están formados por electrones, protones y neutrones.

En realidad, **los responsables de que hayan dos tipos de electrización de los cuerpos son los electrones y protones que constituyen los átomos.**

Los electrones poseen el tipo de electricidad que se denomina negativa (-) y los protones, el que se llama positiva (+). Durante la electrización, cierta cantidad de electrones se desplaza de un cuerpo a otro, o de una parte a otra del propio cuerpo, dando lugar a un exceso o defecto de un tipo u otro de electricidad. La parte con exceso de electrones quedará electrizada negativamente y la parte con defecto de ellos, positivamente.

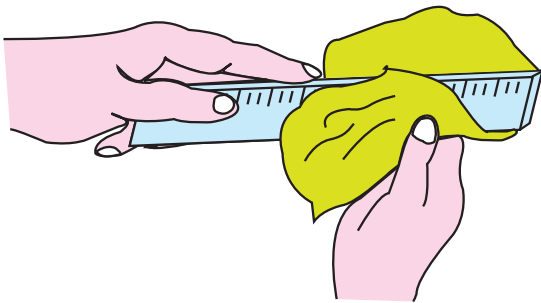


Joseph John Thomson (1856-1940). Se considera el descubridor del electrón (1897), primer constituyente del átomo que se descubrió. Este hallazgo revolucionó la idea que se tenía de que los átomos son indivisibles.

Al frotar una regla plástica con papel, ¿dónde queda exceso de electrones y dónde defecto de ellos? ¿Y al frotar una varilla de vidrio con un paño de seda?

El número de electrones que pasa de un cuerpo a otro durante una experiencia común de electrización por frotamiento es enorme (Fig.1.7a). Es difícil determinar la cantidad que se transfiere a una regla plástica al frotarla con papel, sobre todo porque depende de las condiciones en que se realiza la experiencia, pero la cifra pudiera ser de miles de millones de electrones (del orden de 10^9). Esta fabulosa cifra es, sin embargo, insignificante comparada con la cantidad total de electrones que hay en toda la regla. En una descarga eléctrica atmosférica (Fig.1.7b) pueden transferirse alrededor de 10^{20} electrones, no obstante, el número total de los que hay en la regla es todavía mayor.





(a)



(b)

Fig. 1.7. (a) La cantidad de electrones que se transfiere a una regla plástica al frotarla con papel es enorme, pudiera ser de miles de millones. (b) La cantidad de electrones que se transfiere en una descarga eléctrica es muchísimo mayor, alrededor de 10^{20} electrones, pero el número total de los que hay en la regla es todavía mayor.

Cabe subrayar que no es indispensable frotar dos cuerpos entre sí para que se transfieran electrones de uno a otro, basta con que hagan **buen contacto** y sean de **distintos materiales**. Hacia dónde pasan los electrones y en qué cantidad, depende -dicho muy simplificada- de las características de los materiales, en particular de la concentración de electrones en ellos y de la capacidad de sus átomos o moléculas para atraer a los electrones hacia sí. Mientras mayor sea la diferencia entre dos materiales en lo que respecta a estas características, más fácilmente se electrizarán al ponerlos en contacto. Por supuesto, la cantidad de electrones que se transfiere también depende del número de puntos de las superficies de los cuerpos que entran en contacto, y dicho número aumenta con el frotamiento.

Al poner en contacto estrecho dos cuerpos de materiales diferentes, pueden pasar electrones de uno a otro, quedando ambos electrizados.



Si para electrizar un cuerpo basta con que haga buen contacto con otro de material diferente, entonces ¿qué papel desempeña el frotamiento en las experiencias de electrización?



Hemos visto que dos cuerpos con electricidad de signos opuestos se atraen al aproximarlos, pero sabemos que un cuerpo electrizado también es capaz de atraer a otros neutros (Fig. 1.8). ¿Cómo se explica esto?

Consideremos primeramente el caso en que el cuerpo electrizado se aproxima a un buen conductor, por ejemplo, una regla plástica electrizada negativamente que se acerca a una varilla metálica neutra (Fig. 1.9). En los metales, los electrones más externos de los átomos, a causa de la interacción entre éstos, han perdido los enlaces con un átomo dado y se mueven libremente entre ellos (gracias a esto es que son buenos conductores de la electricidad). Por eso, al acercar la regla plástica electrizada negativamente a la varilla metálica los electrones de ésta, al ser repelidos por la regla, se alejan de ella. La concentración de ellos en la parte de la varilla cercana a la regla se hace menor y en la parte más alejada mayor. La parte próxima a la varilla metálica queda así electrizada positivamente y la alejada, negativamente. Puesto que la fuerza eléctrica disminuye con la distancia y la regla electrizada negativamente está más cerca de la parte positiva de la varilla que de la negativa, predomina la atracción sobre la repulsión, dando por resultado una fuerza neta atractiva entre la regla y la varilla.



Fig.1.8. Un cuerpo electrizado es capaz de atraer no solo a otros electrizados, sino también neutros.

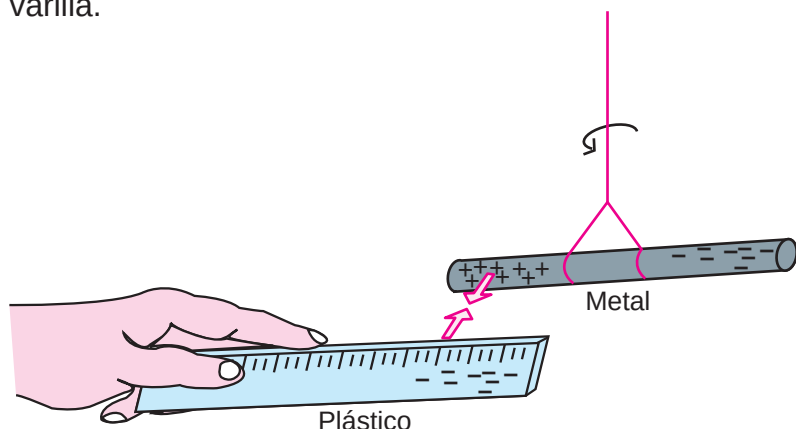


Fig. 1.9. Debido a las fuerzas de repulsión entre los electrones de la regla plástica y de la varilla metálica, la concentración de ellos disminuye en la parte de la varilla próxima a la regla y aumenta en alejada de ella. El resultado es una fuerza neta de atracción entre la regla y la varilla.



Examinemos ahora la situación en que la regla plástica electrizada se aproxima a cuerpos neutros malos conductores de la electricidad. En este caso los electrones no pueden moverse libremente a través del cuerpo, pero se desplazan ligeramente en el interior de las moléculas o átomos (Fig. 1.10), lo que ocasiona que, en promedio, queden más alejados de la regla que los núcleos atómicos, en los que se encuentran los protones. El resultado es una fuerza neta de atracción. Sobre esta cuestión profundizaremos en el apartado 1.2.7.

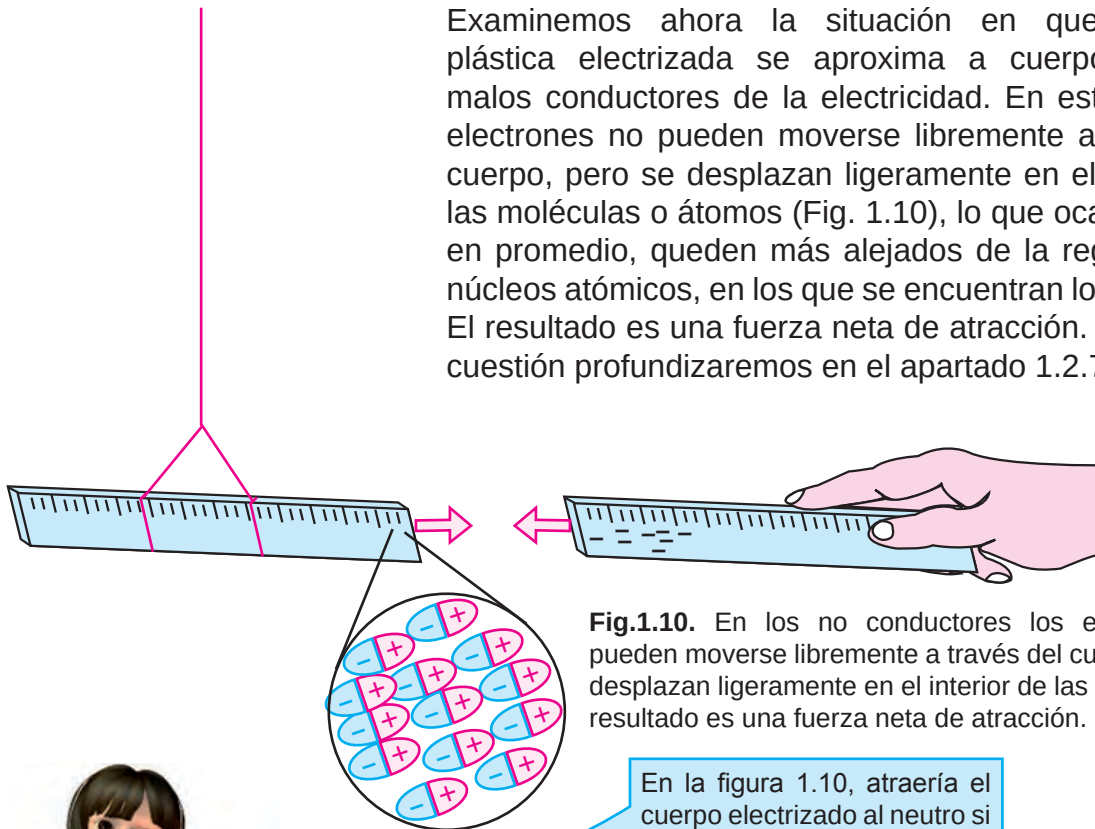


Fig.1.10. En los no conductores los electrones no pueden moverse libremente a través del cuerpo, pero se desplazan ligeramente en el interior de las moléculas. El resultado es una fuerza neta de atracción.

En la figura 1.10, atraería el cuerpo electrizado al neutro si su acción no disminuyera con la distancia?



Hemos visto que los cuerpos pueden ser electrizados, 1) poniéndolos en contacto estrecho con otro cuerpo de un material diferente, contacto que mejora al frotarlos entre sí y 2) transfiriéndoles directamente parte de la electricidad de otro cuerpo (Fig. 1.5). La explicación que acabamos de dar sobre lo que ocurre al acercar un cuerpo electrizado a otro metálico neutro (Fig.1.9) sugiere un tercer procedimiento de electrización. En efecto, si en la experiencia de la figura 1.9 conectásemos la varilla metálica con la tierra, mediante un conductor, o simplemente tocando la varilla con un dedo, entonces los electrones que antes se acumulaban en exceso en el extremo de la varilla, ahora se desplazarán fuera de ella. Si a continuación desconectamos la varilla metálica de la tierra, ella quedará electrizada positivamente, aún después de retirar la regla plástica. Observa que mientras en los dos primeros procedimientos mencionados la electrización se realiza por contacto entre los cuerpos, en este caso se lleva a cabo de un modo indirecto. Por eso algunos denominan este tercer procedimiento, **electrización por inducción**.

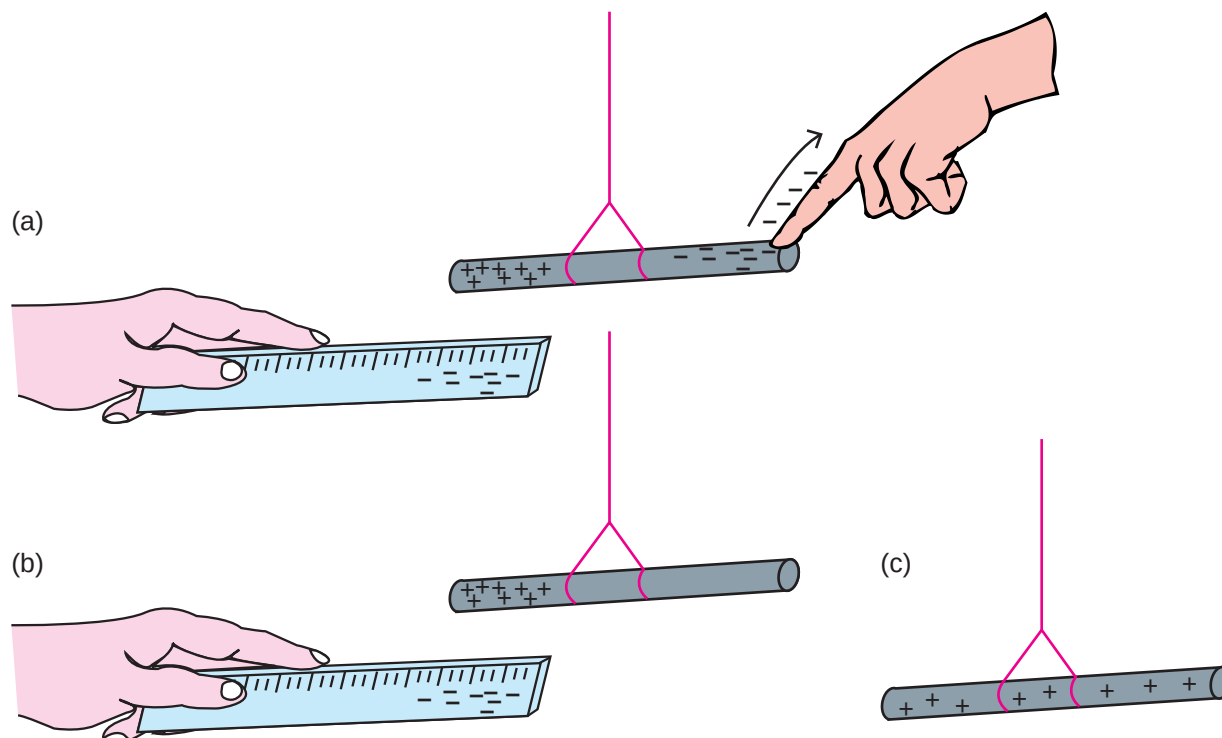


Fig. 1.11. Proceso de electrización de una varilla metálica: (a) la varilla metálica se conecta a tierra a través de la persona y los electrones que antes se acumulaban en su extremo, se desplazan fuera de ella, (b) se retira el dedo y (c) se retira la regla.

¿Pudiera emplearse el procedimiento de electrización descrito en la figura 1.11 para electrizar un cuerpo plástico en lugar de uno metálico? Argumenta.

Observa que en el procedimiento descrito en el pie de la figura 1.11 se dice que se retira el dedo y luego la regla plástica. ¿No podría ser a la inversa? Argumenta.

¿Cómo quedaría cargada la varilla metálica de la figura 1.11, si en vez de la regla plástica se le aproximara una varilla de vidrio cargada positivamente? Argumenta.





1.2.3. Carga eléctrica

Ya conoces que un cuerpo puede estar electrizado en mayor o menor grado. Se denomina **carga eléctrica**, o simplemente **carga**, a la magnitud física que caracteriza el grado de electrización de los cuerpos.

Si la cantidad de electrones que hay en un cuerpo es igual a la de protones, no está electrizado y se dice que su carga eléctrica es cero. Mientras mayor sea el exceso o defecto de electrones que tenga, mayor será su carga. Al hablar de la carga eléctrica de un cuerpo, en realidad se está haciendo referencia al exceso o defecto de ellos.

Además de los electrones y protones, hay otras **partículas elementales** con carga eléctrica de la misma magnitud que el electrón y el protón. Pero de ellas, solo los electrones y protones pueden existir en estado libre por tiempo ilimitado, las demás tienen tiempos de vida inferiores a la millonésima de segundo.

La carga eléctrica de electrones, protones y otras partículas elementales es una propiedad inseparable de esas partículas, no puede eliminarse de ellas, del mismo modo que tampoco es posible eliminar la masa de un cuerpo. Es verdad que los protones y neutrones están formados por otras partículas denominadas **quarks**, con cargas $1/3$ y $2/3$ de la que poseen el electrón y el protón, pero hasta ahora no se han podido detectar quarks individuales y hay razones para suponer que ello no es posible.

Por consiguiente, hasta ahora la carga eléctrica del electrón (o del protón) representa una **cantidad mínima de carga**, imposible de dividir. Ella se denomina **carga eléctrica elemental**.

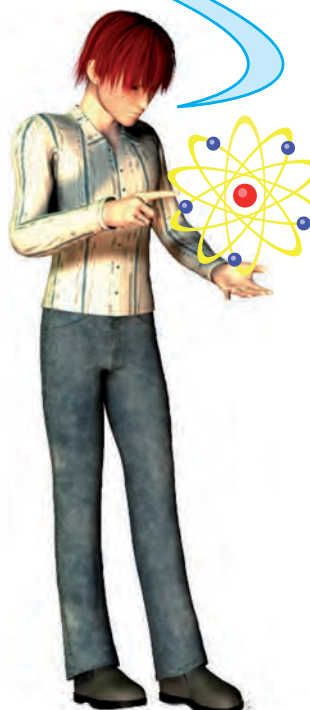
Puesto que los procesos de electrización se realizan mediante transferencia de electrones, la carga transferida es un múltiplo entero de la carga del electrón. Por eso, la carga eléctrica de los cuerpos habituales, así como la de las moléculas, átomos y partículas elementales, siempre es un múltiplo entero de la carga elemental, lo que suele



expresarse diciendo que la carga eléctrica está **cuantizada**.

Ya sabes que durante la electrización de un cuerpo por contacto con otro, uno de ellos se electriza positivamente y el otro negativamente. Es posible comprobar experimentalmente que las cargas eléctricas que adquieren son de igual magnitud. Para ello puede utilizarse, por ejemplo, un instrumento denominado **electroscopio**, o más exactamente, una variante suya más perfeccionada, llamada **electrómetro**. Como su nombre indica, éste es un medidor de electricidad. En la figura 1.12 se muestra una de las variantes de electrómetro más simples y en la figura 1.13 uno moderno, electrónico.

Explica con tus propias palabras qué significa que la carga eléctrica está cuantizada.



Indaga en alguna enciclopedia acerca del electroscopio y su funcionamiento e intenta construir uno. Consulta también la sección del libro Actividades para el aula y la casa.

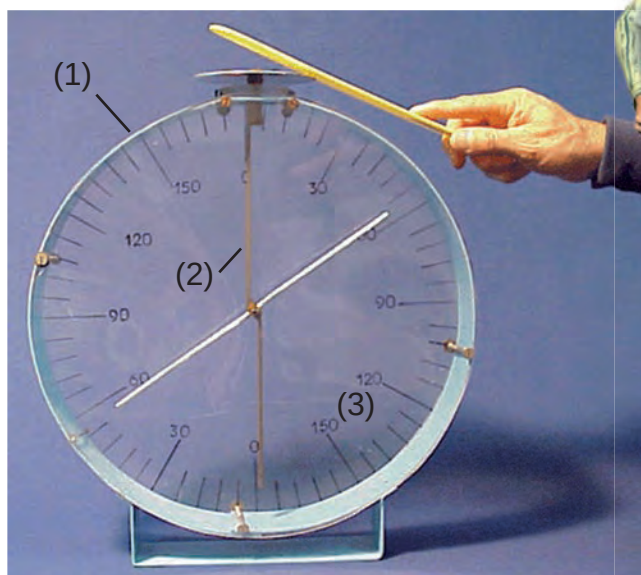


Fig. 1.12. Electrómetro simple constituido por: (1) cuerpo metálico que produce aislamiento eléctrico del exterior, (2) pieza metálica a la cual se acopla una pequeña varilla de aluminio que actúa como indicador, (3) escala.



Fig. 1.13. Un electrómetro electrónico digital, es similar a un voltímetro, pero posee una elevadísima resistencia de entrada, del orden de 10^{12} ohm, característica que lo encarece.



Fig. 1.14. Electrómetro con esfera metálica hueca acoplada a la varilla conductora.

El modelo de la figura 1.12 consta de un cuerpo cilíndrico metálico, cuya función es, aparte de servir de sostén a la pieza fundamental situada en su interior, producir un aislamiento eléctrico del exterior. La parte fundamental está formada por una pieza metálica, fija al cuerpo del instrumento pero aislada eléctricamente de él, a la cual se acopla una pequeña varilla de aluminio que puede girar a modo de indicador. El extremo superior de la pieza metálica sale al exterior y en él se fija un disco, o una esfera. Si éstos se tocan con un cuerpo cargado, parte de la carga se transfiere a la pieza metálica y al indicador, provocando la desviación éste.

Para comprobar que al frotar entre sí dos cuerpos las cargas que adquieren son de igual magnitud, se fija a la varilla que sale del electrómetro una esfera metálica con una abertura (Fig. 1.14). Como cuerpos que se frotan pueden utilizarse, por ejemplo, una pequeña lámina de ebonita y otra de plexiglás, sujetadas por medio de mangos aislantes. Luego de frotarlas, se introduce una de ellas en el interior de la esfera, pero sin tocar ésta, y se observa la indicación del electrómetro. Al extraer esa lámina e introducir la otra, se aprecia que la indicación del electrómetro es la misma, lo cual significa que las cargas eléctricas de las láminas son de igual magnitud. Si ahora se introducen ambas láminas a la vez dentro de la esfera, el indicador del electrómetro no se mueve, lo que confirma que las cargas de las láminas, además de tener igual magnitud, son de signos contrarios.

Explica desde el punto de vista microscópico por qué el indicador del electrómetro se desvía al introducir un cuerpo cargado dentro de la esfera (Fig. 1.14)



¿Por qué en la experiencia de la figura 1.14 para demostrar que las cargas que adquieren las láminas son de signos opuestos, no basta con introducir dentro de la esfera primero una de las láminas y luego la otra, y se requiere introducir las dos al mismo tiempo?



Los resultados anteriores pueden ser descritos del siguiente modo. Inicialmente las láminas de ebonita y plexiglás no están cargadas, por lo que la carga total del sistema formado por las dos es cero. Debido a la interacción que tiene lugar entre ellas durante el frotamiento, la carga de cada lámina deja de ser cero. Sin embargo, la carga total del sistema formado por las dos, continúa siendo cero, lo que significa que el frotamiento no crea carga, sino que solo contribuye a que se transfiera de un cuerpo a otro, la carga total **se conserva**. Probablemente esta descripción se te asemeje en algo a las realizadas al estudiar las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento. Y en efecto, se trata de otra ley de conservación, la **ley de conservación de la carga eléctrica**:

La carga eléctrica total de un sistema se conserva, si el sistema está aislado.

Lo mismo que las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, la de conservación de la carga es universal. En las desintegraciones radiactivas y en las reacciones nucleares de síntesis, en que desaparecen unos elementos y aparecen otros, e incluso en las interacciones en que se aniquilan o crean partículas elementales, como la de aniquilación o surgimiento del par electrón-positrón, la carga total del sistema siempre permanece constante.

Las interacciones fuerte y débil se manifiestan, como ya hemos dicho, solo a distancias menores de 10^{-15} m. Las Interacciones gravitatoria y electromagnética tienen muchísimo mayor alcance, pero la intensidad de la electromagnética supera en un número inmenso de veces a la intensidad de la gravitatoria. Así, por ejemplo, en el átomo de hidrógeno la fuerza eléctrica entre el protón que constituye su núcleo y el electrón es 10^{39} veces mayor que la fuerza de atracción gravitatoria entre ellos. La interacción entre partículas elementales con carga eléctrica, entre ellas el electrón y el protón es, pues, esencialmente electromagnética. Y lo mismo puede decirse de los cuerpos macroscópicos cargados eléctricamente. Al aproximar entre sí dos cuerpos habituales, como por ejemplo una regla plástica y un pedacito de papel, no es posible percibir

¿Por qué si constatamos que entre dos cuerpos habituales se ejerce una fuerza significativa, podemos estar seguros que ella tiene un origen electromagnético?





Resume con tus palabras las propiedades fundamentales de la carga eléctrica.



la fuerza gravitatoria entre ellos, pero basta que la regla esté ligeramente electrizada para que podamos apreciar la fuerza debida a la interacción electromagnética.

Hemos visto varias propiedades fundamentales de la carga eléctrica: que hay un valor mínimo de ella, denominado **carga eléctrica elemental**, el cual coincide con la carga del electrón y del protón; que está **cuantizada**, pues se debe al exceso o defecto de electrones en los cuerpos y, por último, que puede transferirse de unos cuerpos a otros, pero que en total, si el sistema de partículas o cuerpos está aislado, **se conserva**. También habrás advertido que la magnitud de la fuerza ejercida entre dos cuerpos electrizados depende, además de la distancia entre ellos, de la magnitud de las cargas que poseen. En el próximo apartado profundizaremos en esta última cuestión.

1.2.4. Ley de Coulomb

El caso más simple de interacción electromagnética entre cuerpos o partículas con carga eléctrica es aquel en que están en reposo. La parte del electromagnetismo que estudia la interacción electromagnética entre cuerpos o partículas cargados sin considerar el movimiento de éstos se denomina **Electrostática**.

La **ley fundamental de la Electrostática** es la ley de la fuerza que actúa entre dos partículas cargadas en reposo:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

donde q_1 y q_2 son las magnitudes de las cargas que tienen las partículas, r la distancia entre ellas, k un coeficiente de proporcionalidad y F la magnitud de la fuerza.

Dicha ley fue conocida a partir de los experimentos realizados por el físico francés Charles A. Coulomb en 1785, por lo que se denominó **ley de Coulomb**. La constante k a veces se denomina **constante de Coulomb**. Casi cien años después se supo que en realidad el científico inglés Henry Cavendish, célebre por la determinación de la constante de



gravitación universal, había llegado a la ley antes que Coulomb.

Asombrosamente, la expresión matemática de la ley de Coulomb es similar a la de la ley de Gravitación Universal. Como sabes, en ésta, en lugar de las cargas intervienen las masas y el papel de k lo desempeña la constante de gravitación universal:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Las leyes difieren en que mientras la fuerza de gravitación es siempre de atracción, la fuerza de Coulomb puede ser tanto de atracción como de repulsión, en dependencia de los signos de las cargas.



Fig. 1.15. Charles A. Coulomb (1736-1806), científico francés, que destacó por sus trabajos sobre electricidad y magnetismo y por sus investigación de la fuerza de rozamiento.

Puesto que la fuerza entre dos partículas con carga es o de atracción o de repulsión, dicha fuerza está siempre en la línea que las une.

De este modo, la ley puede formularse en palabras del siguiente modo:

La fuerza de interacción entre dos partículas cargadas en reposo es directamente proporcional al producto de los módulos de las cargas, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas y está en la línea que las une.

Nota que lo mismo que la ley de Gravitación, la de Coulomb es válida para **partículas, cuerpos que pueden considerarse como puntos**, en cuyo caso la distancia r entre ellos está bien definida. Para calcular la fuerza entre dos cuerpos cargados habituales, en principio sería necesario considerarlos como compuestos por infinidad de pequeñas porciones cargadas y hallar la suma de las fuerzas ejercidas entre todas ellas.



Fig. 1.16. Esquema del dispositivo utilizado por Coulomb para establecer la ley de la fuerza de interacción entre dos partículas cargadas.

¿Por qué la distribución de las cargas en las esferas A y B del experimento de Coulomb no es estrictamente uniforme?



En la figura 1.16 se muestra un esquema del dispositivo utilizado por Coulomb. Básicamente consiste en una **balanza de torsión**, la cual está formada por una fibra de torsión a cuyo extremo inferior se fija una barrita aislante con dos esferas en sus extremos. Otra esfera está suspendida de la tapa del dispositivo mediante una varilla. Al comunicarle cargas del mismo signo a las esferas A y B, la balanza rota y a partir del ángulo girado puede determinarse la fuerza entre las esferas. Para mantener la misma distancia entre las esferas al variar la carga, Coulomb giraba la pieza de la cual está suspendida la fibra y a partir del ángulo girado determinaba la fuerza. En el experimento, las esferas A y B no podían considerarse puntos, pues la distancia entre ellas no era grande, Coulomb medía la distancia r entre sus centros. Si la distribución de carga en las esferas tiene simetría esférica, entonces, en efecto, de modo parecido que en el caso de la gravitación, es posible considerar que toda la carga está concentrada en sus centros. En el experimento, Coulomb no tuvo en cuenta que la distribución de cargas en las esferas no era estrictamente esférica, debido a la presencia de la otra esfera.

La dificultad principal del experimento radicaba en la medición de la carga eléctrica de las esferas. En aquella época ni siquiera se había definido la unidad de carga. Pero Coulomb encontró un modo simple de disminuir la carga inicial de una de las esferas en 2, 4,... veces: la ponía en contacto con otra exactamente



igual pero neutra. Al hacer esto la carga de la esfera se compartía por igual entre las dos. De este modo determinó, que al disminuir la carga de la esfera en 2, 4... veces, la fuerza disminuía en ese mismo número de veces, es decir, que era directamente proporcional a la carga de la esfera.

¿Qué ley fundamental está la base del procedimiento empleado por Coulomb para dividir la carga eléctrica de una de las esferitas de su dispositivo en 2, 4, ...?

En 1798 Cavendish realizó un experimento similar para determinar, a partir de la medición de la fuerza gravitatoria entre dos esferas, la constante de gravitación universal, sólo que la balanza y los cuerpos utilizados en ese caso fueron muchísimo mayores.

En el experimento de Coulomb (Fig. 1.15), ¿será igual la fuerza ejercida por la esfera A sobre la B que la ejercida por la B sobre la A, si las cargas de las esferas no son de igual magnitud? Argumenta



1.2.4.1. Unidad de carga eléctrica

En principio, la unidad de carga eléctrica puede elegirse a partir de la ley de Coulomb, ya que las unidades fundamentales de las otras magnitudes que intervienen en la ley, distancia y fuerza, han sido definidas. Por ejemplo, podrían situarse dos esferas a un metro una de otra y elegir como unidad de carga aquella que tienen cuando la fuerza entre ellas sea de 1 N. Con tal definición de la unidad de carga, la constante k en la ley de Coulomb tendría el valor 1. En una época se hizo así, sin embargo, en el sistema internacional de unidades (SI), como unidad fundamental para la medición de las magnitudes eléctricas se introdujo el **ampere (A)**, que es la unidad de intensidad de corriente. Por eso, el resto de las unidades de las magnitudes eléctricas, incluida la de carga eléctrica, se definen a partir de esa



unidad. El patrón del ampere se establece basándose en la interacción magnética entre conductores con corriente eléctrica, por lo que profundizaremos en él más adelante. Por ahora diremos que:

La unidad de carga eléctrica, denominada coulomb (C), es la carga que pasa en 1 s por la sección transversal de un conductor cuando la intensidad de corriente es 1 A.

Al definir la unidad de carga de este modo, el coeficiente k en la expresión de la ley de Coulomb debe ser determinado experimentalmente. Su valor es:

$$k = 9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

Una carga eléctrica de 1 C es inmensamente grande. Así, la fuerza de interacción entre dos partículas que tuviesen una carga de 1 C cada una, colocadas a 1 m de distancia una de la otra, sería:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1 \text{ C})(1 \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 9.0 \times 10^9 \text{ N}$$

Esto es solo algo menor que el peso de un cuerpo de mil millones de kilogramos. Se comprenderá que comunicar una carga de 1 C a un cuerpo habitual resulta totalmente imposible. El exceso (o defecto) de electrones en el cuerpo sería tan grande que los electrones (o protones), repeliéndose mutuamente no podrían mantenerse en él. Las cargas que adquieren los cuerpos en las experiencias ordinarias de electrización por frotamiento por lo general son inferiores a $1 \times 10^{-6} \text{ C}$, es decir, $1 \mu\text{C}$.

Expresada en coulomb, la magnitud de la carga de un electrón o un protón, o sea de la **carga eléctrica elemental**, es:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$



Ejemplo 1.1. Calcula cuántos electrones hay en una gota de agua de 1.0 milímetro de radio. Considera la densidad del agua 1.0 g/cm^3 y la masa de una molécula $3.0 \times 10^{-23} \text{ g}$.

Cada molécula de agua tiene 10 electrones. Por eso, si hallamos el número de moléculas de agua que hay en la gota, podremos calcular el número total de electrones en ella.

Si llamamos m_g a la masa de la gota y m_m a la masa de una molécula de agua, entonces el número de moléculas en la gota es:

$$N = \frac{m_g}{m_m}$$

La masa de la gota es:

$$m_g = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 = \left(1.0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \frac{4}{3} \pi (1.0 \times 10^{-1} \text{ cm})^3 = 4.19 \times 10^{-3} \text{ g}$$

Por consiguiente el número de moléculas en la gota es:

$$N = \frac{m_g}{m_m} = \frac{4.19 \times 10^{-3} \text{ g}}{3.0 \times 10^{-23} \text{ g}} = 1.4 \times 10^{20}$$

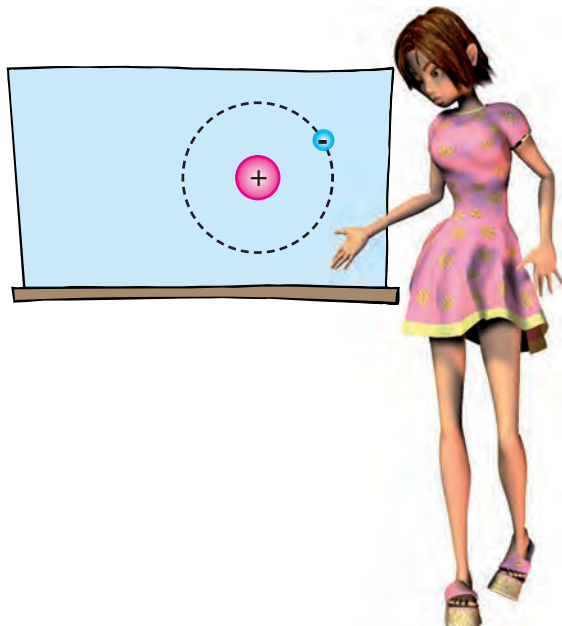
Y el número de electrones en ella:

$$10 \times 1.4 \times 10^{20} = 1.4 \times 10^{21} \text{ electrones}$$





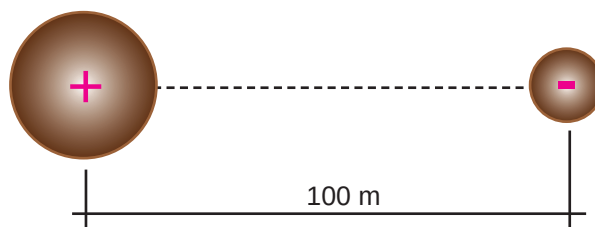
Ejemplo 1.2. Halla la fuerza eléctrica entre el electrón y el núcleo en el átomo de hidrógeno, considerando que el radio de éste es $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$.



La fuerza entre el electrón y el núcleo está determinada por la ley de Coulomb. La distancia promedio entre ellos es igual al radio del átomo: $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$. La magnitud de la carga del electrón y también del protón que constituye el núcleo del átomo, es igual a la carga elemental: $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Por tanto:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0.53 \times 10^{-10} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Ejemplo 1.3. Considera un pequeño cubo de cobre de 1.0 cm de arista. a) Conociendo que la densidad del cobre es 8.9 g/cm^3 , su masa atómica $1.06 \times 10^{-22} \text{ g}$ y su número atómico 29, determina cuántos electrones y protones hay en el cubo. b) Imagina que los protones y electrones del cubito de cobre pudieran concentrarse separadamente en dos esferitas y que éstas se situaran a una distancia de 100 m una de otra, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas? c) ¿Cuál sería dicha fuerza si las esferitas se situaran una en la Tierra y la otra en la Luna, a $3.8 \times 10^8 \text{ m}$ de distancia?





a) Puesto que la densidad del cobre es 8.9 g/cm^3 , la masa de un cubo de 1 cm^3 es:

$$\rho = \frac{m}{V}, m = \rho V = \left(8.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) (1 \text{ cm}^3) = 8.9 \text{ g}$$

Cada átomo tiene una masa de $1.06 \times 10^{-22} \text{ g}$, el número de átomos en el cubito es:

$$\frac{8.9 \text{ g}}{1.06 \times 10^{-22} \text{ g}} = 8.4 \times 10^{22}$$

Tanto el número de protones como el de electrones que tiene cada átomo de cobre es 29, por lo que el número de ellos en el cubo es:

$$(29)(8.4 \times 10^{22}) = 2.4 \times 10^{24}$$

b) La carga elemental es $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Por consiguiente, la magnitud de la carga de cada esferita es:

$$q = (2.4 \times 10^{24})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 3.9 \times 10^5 \text{ C}$$

Ya sabes que de por sí 1 C es una carga muy grande, así que la carga anterior es inmensa.

Para calcular la fuerza de atracción que se ejercería entre esferitas con tales cargas situadas a 100 m una de la otra, utilizamos la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(3.9 \times 10^5 \text{ C})(3.9 \times 10^5 \text{ C})}{(100 \text{ m})^2} = 1.4 \times 10^{17} \text{ N}$$

Como comprenderás, ésta es una fuerza increíblemente grande.

c) El cálculo de la fuerza entre las esferitas si se colocaran una en la Tierra y la otra en la Luna es similar al anterior, solo que ahora la distancia es $3.8 \times 10^8 \text{ m}$.

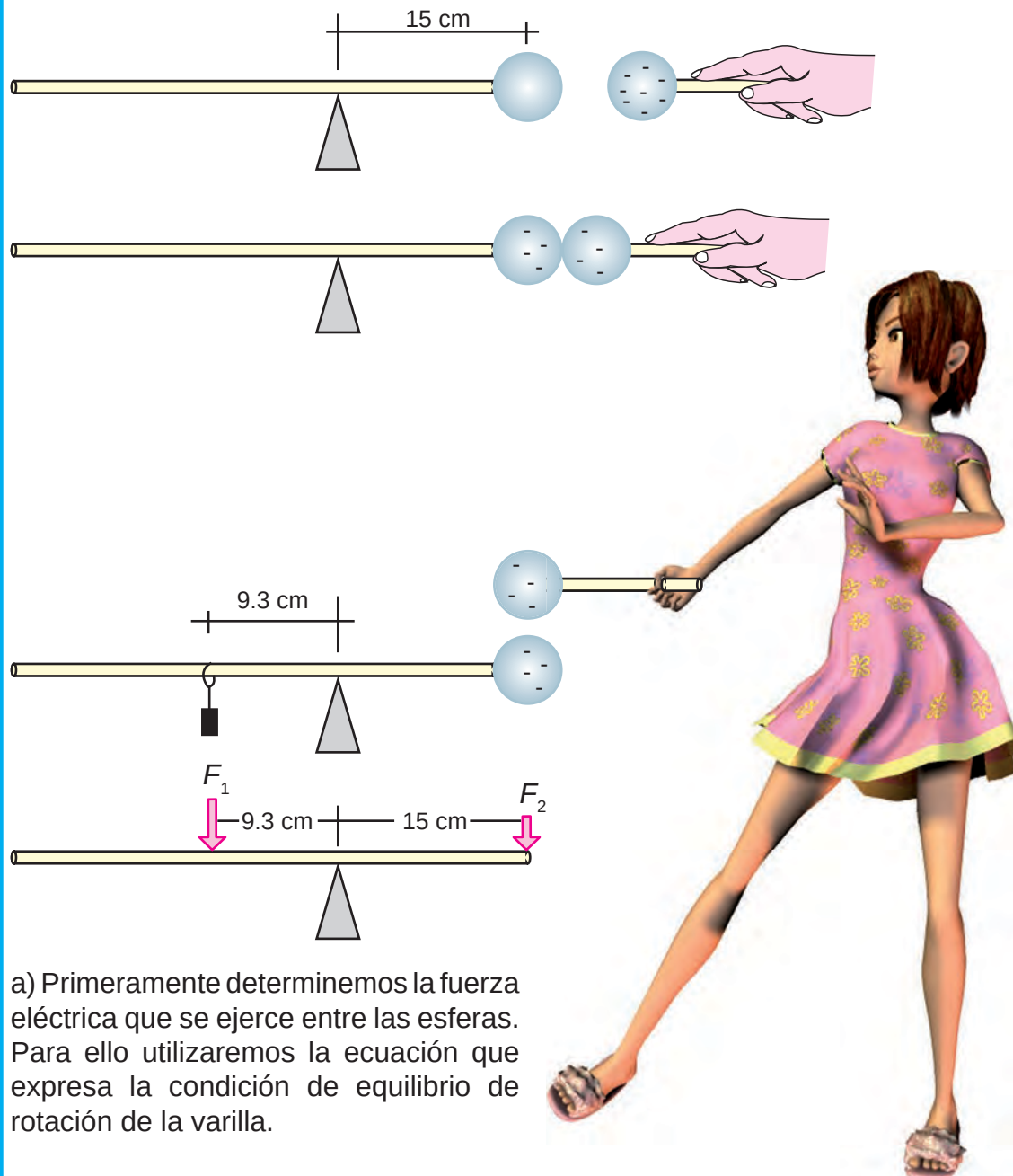
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(3.9 \times 10^5 \text{ C})(3.9 \times 10^5 \text{ C})}{(3.8 \times 10^8 \text{ m})^2} = 9.5 \times 10^3 \text{ N}$$



Nota que aún cuando las esferitas se colocaran una de otra a una distancia tan grande como la que hay entre la Tierra y la Luna, la fuerza de atracción entre ellas seguiría siendo grande. Dicha fuerza es aproximadamente igual a la que hay que ejercer para levantar un cuerpo de 1000 kg en la Tierra.



Ejemplo 1.4. En un extremo de una varilla no conductora se fija una pequeña esfera metálica y el conjunto se equilibra horizontalmente sobre un pivote, quedando el centro de la esfera a 15 cm de él. Otra esfera idéntica, sostenida mediante un manguito aislante, se electriza negativamente y luego se pone en contacto por un instante con la que está fija a la varilla. A continuación la esfera del manguito se coloca sobre la del extremo de la varilla, a 5.0 cm de ella. El equilibrio de la varilla se restituyó colocando una carguita de 1.0 g a 9.3 cm del pivote. a) ¿Cuál era la carga de las esferas? b) ¿Cuál el exceso o defecto de electrones en ellas?



a) Primeramente determinemos la fuerza eléctrica que se ejerce entre las esferas. Para ello utilizaremos la ecuación que expresa la condición de equilibrio de rotación de la varilla.



Si como eje para calcular los momentos de las fuerzas, elegimos el que pasa por el pivote y como sentido positivo el del giro contrario a las agujas de un reloj, tenemos:

$$b_1 F_1 - b_2 F_2 = 0$$

F_1 es la magnitud de la fuerza ejercida por la carga que cuelga de la varilla (mg), F_2 la de la fuerza eléctrica de la esfera del manguito sobre la esfera de la varilla, y b_1 y b_2 los brazos de las fuerzas. De la ecuación anterior:

$$F_2 = \frac{b_1}{b_2} F_1 = \left(\frac{9.3 \text{ cm}}{15 \text{ cm}} \right) (0.001 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 0.00608 \text{ N}$$

Ahora utilizamos la ley de Coulomb para calcular la carga de las esferas.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Puesto que las esferas son idénticas, cuando se toca con la esfera electrizada a la otra, ambas quedan igualmente cargadas. De ahí que:

$$F_2 = k \frac{qq}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}$$

Resolviendo la ecuación anterior para q :

$$q^2 = \frac{F_2}{k} r^2$$

Extrayendo raíz cuadrada a ambos miembros de la ecuación y sustituyendo los valores:

$$q = r \sqrt{\frac{F_2}{k}} = 4.1 \times 10^{-8} \text{ C}$$

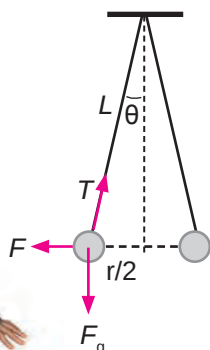
b) Para hallar el número de electrones en exceso que hay en cada esfera, simplemente dividimos la carga de la esfera entre la carga de un electrón.

$$\frac{q}{e} = \frac{1.3 \times 10^{-8} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2.5 \times 10^{11}$$

Este número de electrones en exceso es inmenso, pero de todos modos es muy pequeño comparado con el número total de electrones libres en las esferas.



Ejemplo 1.5. Dos pequeñas esferas idénticas y cargadas con iguales cargas se suspenden de hilos aisladores de 1.0 m de longitud, fijos a un mismo punto. Las esferas quedaron separadas 10 cm. a) ¿Cuál era la fuerza eléctrica entre ellas? b) ¿Cuál era la magnitud de la carga eléctrica de las esferas? c) ¿Qué cantidad de electrones tenían en exceso? La masa de las esferas era 10 g. La masa del hilo podía despreciarse.



En la figura se muestra un esquema de la situación descrita. También se han representado las tres fuerzas que actúan sobre una de las esferas: la de gravedad, la fuerza eléctrica y la tensión del hilo:

a) Para determinar la fuerza entre las esferas aplicamos la condición de equilibrio de traslación a una de ellas. Si se elige un sistema de coordenadas X-Y con el eje Y según la vertical y el X según la horizontal, se tiene:

La suma de las componentes de la fuerzas según X:

$$T \sin \theta - F = 0$$

$$\text{de donde: } T \sin \theta = F \quad \text{-----} \rightarrow (1)$$

La suma de las componentes según Y:

$$T \cos \theta - F_g = 0$$

$$T \cos \theta = F_g \quad \text{-----} \rightarrow (2)$$

Dividiendo miembro a miembro la ecuación (1) entre la (2):

$$\tan \theta = \frac{F}{F_g}, \text{ de donde}$$

$$F = F_g \tan \theta$$

Hay diferentes variantes para calcular $\tan \theta$. Una de las más rápidas consiste en hallar primero θ a partir del seno del ángulo:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{r}{2}}{L} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{r}{2L} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{10 \text{ cm}}{2(100 \text{ cm})} \right) = \sin^{-1}(0.050)$$



De donde $\theta = 2.87^\circ$

Luego se calcula $\tan \theta = 0.050$

Si se emplea una calculadora los dos pasos anteriores pueden hacerse inmediatamente uno a continuación del otro en la propia calculadora.

En realidad, en este caso ni siquiera era necesario emplear una calculadora para hallar la tangente del ángulo. En la situación analizada, el ángulo θ es muy pequeño y, como ya sabes, en tal caso la tangente y el seno son aproximadamente iguales, por lo que se tiene:

$$\tan \theta \approx \sin \theta = \frac{\frac{r}{2}}{L} = \frac{r}{2L} = \frac{10 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} = 0.050$$

Observa que el resultado es el mismo que el obtenido anteriormente. Pero recuerda que solo es posible seguir este procedimiento si el ángulo es muy pequeño.

La fuerza eléctrica es, por tanto:

$$F = F_g \tan \theta = (0.010 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) (0.050) = 0.0049 \text{ N}$$

b) Para hallar la carga de las esferas nos valemos de la ley de Coulomb teniendo en cuenta que sus cargas son iguales, es decir, que $q_1 = q_2 = q$:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}$$

$$\text{De donde } q^2 = \frac{F}{k} r^2$$

Por consiguiente, la magnitud de la carga eléctrica de las esferas es:

$$q = r \sqrt{\frac{F}{k}} = 0.10 \text{ m} \sqrt{\frac{0.0049}{9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}}} = 7.4 \times 10^{-8} \text{ C}$$

c) Para hallar cuantos electrones tienen en exceso las esferas, dividimos la carga que poseen entre la carga del electrón, o sea, entre la carga elemental. Dicho número es:

$$\frac{q}{e} = \frac{7.4 \times 10^{-8} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 4.6 \times 10^{11}$$

Como en el caso del ejemplo anterior, este número de electrones en exceso es muy grande, pero de todos modos es pequeño comparado con la cantidad total de electrones libres de las esferas.



1.2.5. Campo eléctrico

Hemos examinado la ley fundamental de la interacción entre dos cuerpos cargados en reposo, pero *¿cómo se transmite la acción de un cuerpo sobre otro?*

Las leyes de gravitación y de Coulomb dicen el modo de calcular las fuerzas gravitatoria y eléctrica entre dos partículas, pero no cómo se transmite la acción de una partícula a otra. La experiencia sugiere que para que un cuerpo actúe sobre otro a cierta distancia, debe producir algo que llegue hasta él, o transmitir su acción a través de cierto medio entre ellos, como en el caso de las ondas. En otras palabras, todo parece indicar que un cuerpo no puede actuar sobre otro **a distancia**, sin que intervenga algún intermediario. Pese a ello, el triunfo que representó haber obtenido las leyes de gravitación y de Coulomb sin prestar atención al mecanismo de transmisión de la fuerza y los éxitos alcanzados en la aplicación de estas leyes, durante largo tiempo hizo olvidar a los científicos la búsqueda de un agente transmisor de la fuerza.

Sin embargo, Michael Faraday retomó la cuestión y planteó la hipótesis de que los cuerpos con carga eléctrica no actúan directamente uno sobre otro, sino que cada cuerpo tiene asociado un **campo eléctrico** que se extiende por el espacio y que es ese campo el que actúa sobre el otro cuerpo. Pero a partir de experimentos con cuerpos cargados en reposo era imposible comprobar la hipótesis de Faraday. Por eso esta idea triunfó solo luego de haberse estudiado la interacción entre partículas cargadas en movimiento.

Hoy se sabe que el campo realmente existe. Si se tienen dos cuerpos electrizados, *A* y *B*, a determinada distancia uno del otro (Fig.1.16) y movemos, digamos, el *A* hacia el *B*, éste “siente” el cambio producido en la posición de *A*, pero no instantáneamente, se requiere determinado tiempo para ello. La transmisión hacia *B* del cambio producido en la posición de *A* parece instantánea porque se realiza a una velocidad muy grande, aproximadamente a 300 000 km/s. Sin embargo, es conocido, por ejemplo, que las oscilaciones de los electrones en la antena transmisora de



No, lo hace por mediación del campo eléctrico. Además, si acercamos o alejamos uno de los cuerpos, el otro demora cierto tiempo en “enterarse”.

una nave cerca del planeta Marte se registran en la Tierra solo al cabo de unos 5 min. En este caso la distancia es tan grande, que el tiempo que demora en transmitirse el cambio producido en la antena de la nave a la Tierra, es claramente apreciable.

¿Entonces un cuerpo electrizado no actúa directamente sobre otro?



Fig. 1.16. Dos tiras de acetato electrizadas. Al desplazar la tira A hacia la B, ésta parece “sentir” el cambio producido en la posición de A instantáneamente, pero en realidad para ello se requiere cierto tiempo.

1.2.5.1. Intensidad de campo eléctrico

Si en el espacio que rodea a un cuerpo electrizado, es decir, en algún punto de su campo eléctrico, situamos una partícula con carga q , entonces, como sabes, sobre la partícula actúa cierta fuerza $\vec{F}$ (Fig. 1.17). Al medir la fuerza colocando alternativamente en el mismo punto partículas con diferentes cargas, se encuentra que la fuerza es proporcional a la carga de las partículas, es decir que $\vec{F}/q = \text{const.}$ Puesto que esta magnitud es constante y no depende de la carga q de la partícula, sino solo del campo, puede ser utilizada para caracterizarlo.

La **intensidad del campo eléctrico** ($\vec{E}$) es igual al cociente entre la fuerza con que actúa sobre una partícula cargada y la magnitud de la carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

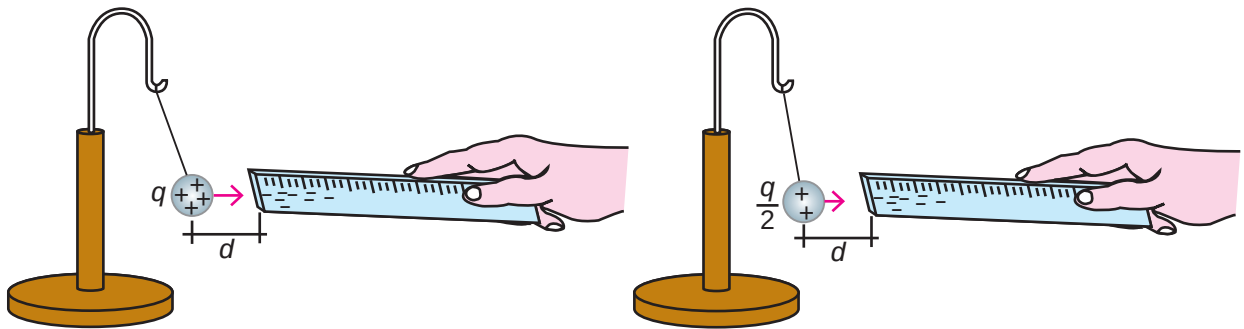


Fig. 1.17. Si en un punto del campo que rodea a un cuerpo cargado, alternativamente se colocan partículas con diferentes cargas se encuentra que la fuerza eléctrica es proporcional a la carga de la partícula, es decir: $\vec{F}/q = \text{const.}$ Esta magnitud se denomina intensidad de campo eléctrico.

Nota que como la fuerza es un vector, la **intensidad de campo** $\vec{E}$ también es un vector, que tiene la misma dirección que la fuerza. Pero ya que la carga q de la partícula sobre la que actúa el campo puede ser positiva o negativa, entonces, según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$, si la carga es positiva el sentido del vector intensidad de campo coincide con el de la fuerza y si es negativa, es opuesto. Cabe subrayar que el vector intensidad de campo eléctrico (su magnitud, dirección y sentido) no depende de la carga de la partícula que se coloca en el campo, sino solo de la que lo origina.

En la figura 1.17, ¿cuál será la dirección y sentido del campo $\vec{E}$ asociado a la regla en el punto donde está la partícula? ¿Variaría el sentido del campo si la partícula tuviese carga negativa en lugar de positiva? ¿Qué sucedería con la intensidad de campo si en el punto considerado no hubiese partícula alguna?





Según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$, en unidades del Sistema Internacional la intensidad de campo eléctrico puede expresarse en **newton sobre coulomb** (N/C).

La tabla 1.2 muestra algunos valores característicos de intensidades de campo eléctrico.

Tabla 1.2. Algunos valores característicos de intensidades de campo eléctrico.

Campo eléctrico	E (N/C)
En un tubo de luz fluorescente	10^1
En la atmósfera cerca de la Tierra, con buen tiempo	10^2
Cerca de una regla plástica cargada o de un globo frotado con el pelo	10^3
En el tambor cargado de una fotocopidora	10^5
Cuando ocurre una descarga eléctrica en el aire	$> 3 \times 10^6$
Cerca del electrón en un átomo de hidrógeno	5×10^{11}
En la superficie de un núcleo de uranio	3×10^{21}

La distribución del vector intensidad de campo eléctrico en los puntos que rodean a un cuerpo electrizado puede ser muy compleja y por tanto difícil de encontrar una ecuación que la describa. Para ello en principio habría que determinar, para cada punto, la suma de las intensidades de los campos debidos a todas las partículas cargadas del cuerpo. En ciertos casos cuando éstas se distribuyen uniformemente según una forma geométrica regular, como en un alambre recto y largo, en una esfera metálica, o en una extensa lámina metálica plana, es posible hallar fácilmente la suma con ayuda del **cálculo integral**. En otros casos más complejos puede utilizarse una computadora. Cómo hacer esto, lo estudiarás en la formación profesional, aquí nos limitaremos a hallar la intensidad de campo eléctrico alrededor de una **partícula** cargada, que es un caso simple, pero básico para enfrentar los demás.

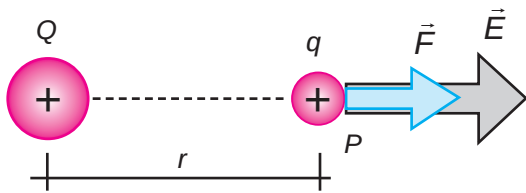


Fig. 1.18. Para hallar la intensidad del campo eléctrico de la partícula con carga Q , se determina la fuerza $\vec{F}$ que ella ejerce sobre la partícula de carga arbitraria q , y se divide entre dicha carga. La dirección de $\vec{E}$ es la misma que la de $\vec{F}$ y si q es positiva, su sentido también.

1.2.5.2. Intensidad de campo eléctrico de una partícula con carga

Consideremos una partícula con carga Q (Fig.1.18). Para hallar la intensidad de su campo eléctrico en cierto punto P , según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$ debemos encontrar la fuerza $\vec{F}$ ejercida sobre otra partícula con carga arbitraria q situada en ese punto y dividirla entre dicha carga. La dirección de $\vec{E}$ será la de $\vec{F}$, y si la carga q es positiva, su sentido también coincide con el de $\vec{F}$.

En la figura 1.18, ¿cómo sería el sentido de la fuerza $\vec{F}$ si Q fuese negativa en lugar de positiva? ¿y el sentido de la intensidad de campo eléctrico $\vec{E}$?

De acuerdo con la ley de Coulomb, la magnitud de la fuerza sobre la partícula con carga q es:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}$$

por lo que la magnitud del campo en P es:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{q}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

Nota que la magnitud del campo decrece con el cuadrado de la distancia r a la partícula que lo origina.





Ejemplo 1.6. La superficie de nuestro planeta está rodeada por un campo eléctrico dirigido hacia su interior, cuya magnitud es, en promedio, 150 N/C. Considera que en cierta región en que la intensidad del campo tiene ese valor se tiene un globo con una carga de 2.0×10^{-7} C. a) Determina la fuerza eléctrica ejercida sobre el globo. b) Compara dicha fuerza con la fuerza de gravedad, suponiendo que tiene una masa de 10 g.

a) La magnitud del campo eléctrico es $E = F/q$, donde F es la fuerza ejercida sobre una partícula con carga q situada en el campo. De ahí que para el globo:

$$F = qE$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$F = (2.0 \times 10^{-7} \text{ C}) \left(150 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 3.0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

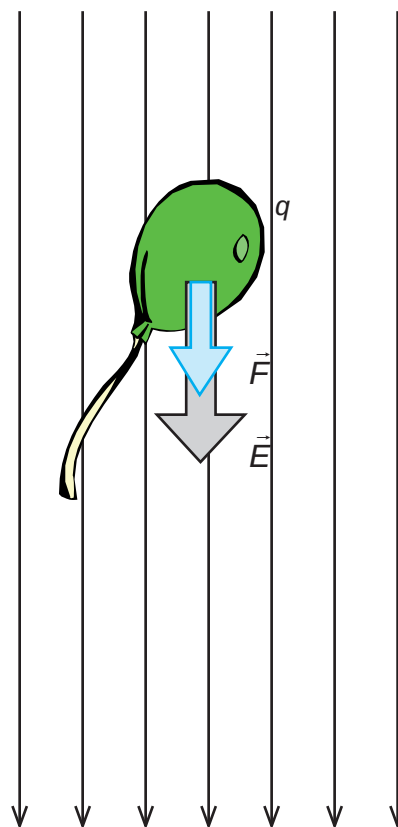
b) La fuerza de gravedad sobre el globo es:

$$F_g = mg = (0.010 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 0.098 \text{ N} \approx 0.10 \text{ N}$$

El cociente entre la fuerza de gravedad y la fuerza debida al campo eléctrico es:

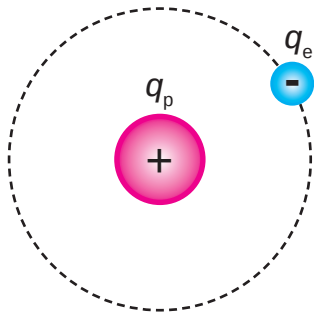
$$\frac{F_g}{F} = \frac{0.10 \text{ N}}{3.0 \times 10^{-5} \text{ N}} = 3.3 \times 10^3$$

La fuerza de gravedad sobre el globo es tres mil veces mayor que la eléctrica.





Ejemplo 1.7. El radio del átomo de hidrógeno es 0.53×10^{-10} m. Determina la magnitud del campo eléctrico originado por su núcleo en las proximidades del electrón.



El núcleo del átomo de hidrógeno es un protón. La magnitud del campo eléctrico originado por él cerca del electrón es:

$$E = \frac{F}{q_e}$$

F es la fuerza ejercida sobre el electrón y q_e la carga de éste. Según la ley de Colulomb, la fuerza es:

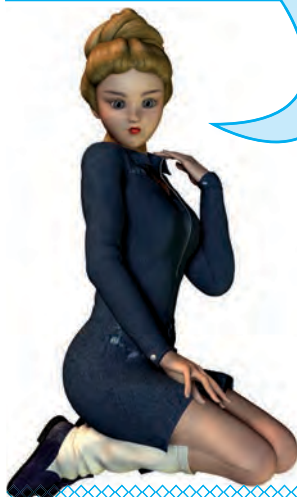
$F = k \frac{q_p q_e}{r^2}$, donde q_p es la carga del protón. Por consiguiente:

$$E = \frac{k \frac{q_p q_e}{r^2}}{q_e} = k \frac{q_p}{r^2} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{(0.53 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

$$E = 5.1 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Observa que el valor hallado coincide con el de la tabla 1.2.

¿Cómo representarías la intensidad del campo eléctrico en torno a una partícula con carga negativa?



Podemos tener una representación del campo eléctrico en torno a una partícula cargada, dibujando los vectores intensidad de campo en varios puntos alrededor de la partícula (Fig. 1.19).

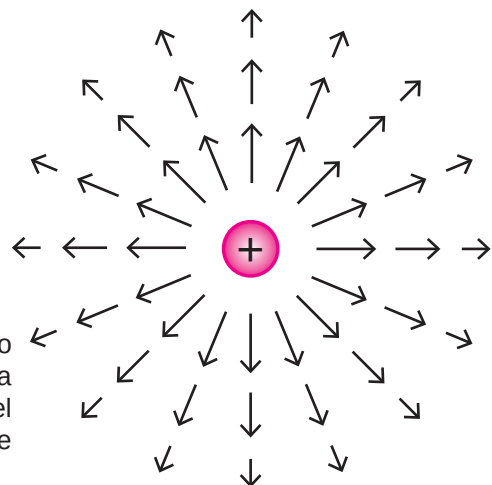


Fig. 1.19. Intensidad del campo eléctrico en torno a una partícula con carga positiva. La intensidad del campo eléctrico es radial y decrece con la distancia.



1.2.5.3. Líneas de campo eléctrico

La figura 1.19 sugiere describir las características del campo eléctrico por medio de líneas. Michael Faraday suponía que el espacio en torno a cuerpos con carga estaba lleno de una especie de hilos, que denominó líneas de fuerza. En la actualidad tales líneas, generalmente denominadas **líneas de campo eléctrico**, se consideran solo un **recurso útil para visualizar características básicas del campo** alrededor de cuerpos cargados. Ya hemos dicho que la distribución de la intensidad del campo eléctrico en torno a cuerpos electrizados puede ser compleja. Incluso aún cuando sea posible hallar una ecuación que la describa, ésta puede resultar difícil de interpretar a simple vista. En tales casos la representación de las líneas del campo constituye un excelente recurso visual para describir las características del campo.

Las líneas de campo eléctrico son líneas en el espacio, rectas o curvas, tales que: 1) su tangente en cada punto tiene la dirección del vector campo eléctrico en ese punto, 2) la separación entre ellas da idea de la intensidad del campo: donde las líneas estén más unidas, el campo es más intenso y donde estén más separadas, menos intenso.

Así, en la figura 1.20, las líneas del campo son más densas en la superficie A que en la B, lo que indica que en la superficie A la intensidad del campo es mayor. Por otra parte, puesto que en este caso las líneas son curvas, y la intensidad del campo es tangente a ellas en cada punto, significa que en similares puntos de un plano y otro las intensidades de campo no tienen igual dirección.

En la figura 1.21 se muestran las líneas de campo correspondientes a una partícula con carga positiva (a), y con carga negativa (b). Solo se han dibujado las líneas de campo en el plano que está la carga, pero debes tener en cuenta que abarcan todo el espacio alrededor de la partícula. Nota que las líneas se separan a medida que se alejan de las partículas, lo que indica que la intensidad de campo se va haciendo cada vez menor. Por otra parte, en el caso de la partícula positiva, las líneas están dirigidas en

¿Cuál es la importancia que tiene la representación del campo eléctrico por medio de líneas de campo?

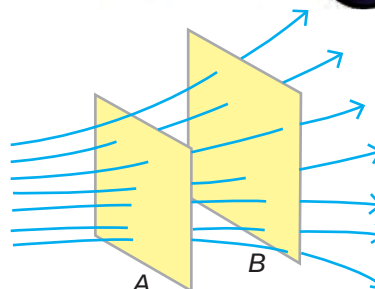


Fig. 1.20. Líneas de campo eléctrico. En el plano A la intensidad del campo es mayor que el B. En puntos similares de los planos, el campo no tiene la misma dirección.



el sentido que se alejan de la partícula, mientras que en el caso de la negativa, hacia ella.

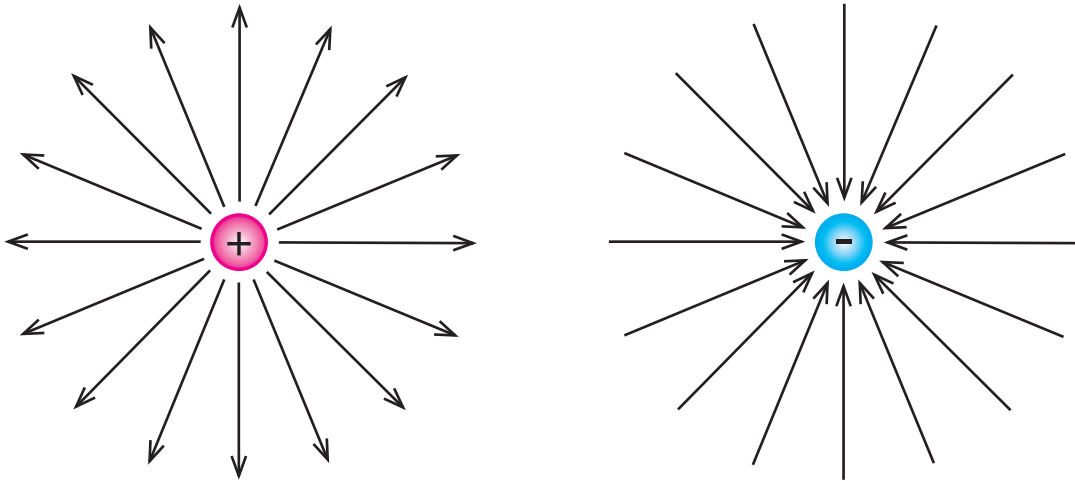


Fig. 1.21. Líneas de campo eléctrico en torno a una partícula: (a) con carga positiva y (b) con carga negativa. La menor separación entre las líneas a medida que se alejan de las partículas indica que la intensidad del campo decrece con la distancia a ellas.



¿Hasta dónde llegarían las líneas de campo de una partícula cargada, que estuviese de todo cuerpo? Argumenta.

Las líneas de campo pueden hacerse “visibles” utilizando pequeñas porciones alargadas de algún material aislante mezcladas con un líquido viscoso. Al introducir un cuerpo cargado dentro de tal preparación, las porciones de material se alinean haciendo “visibles” las líneas de campo. La figura 1.22 muestra cómo pequeñas hebras de hilo suspendidas en aceite se alinean alrededor de un conductor cargado.

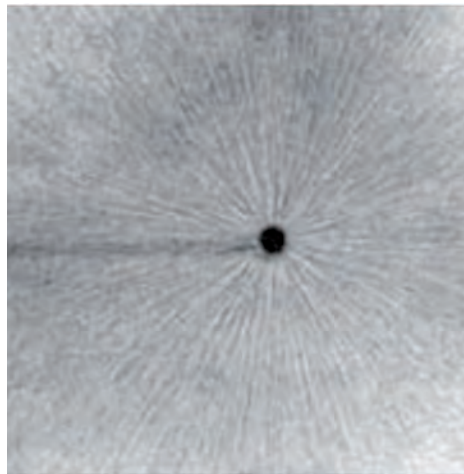


Fig. 1.22. Pequeñas hebras de hilo suspendidas en aceite se alinean alrededor de un conductor cargado.



En la figura 1.23 se ilustran las líneas de campo correspondientes a: (a) dos partículas con cargas de igual magnitud y diferentes signos, (b) dos partículas con cargas de igual magnitud y signo, (c) una lámina extensa con carga positiva y (d) dos láminas extensas paralelas entre sí con cargas de igual magnitud y diferente signo. Los dos últimos casos tienen especial interés. Observa que en (c) las líneas del campo son perpendiculares a la lámina y están igualmente agrupadas. Esto indica que en cualquier punto frente a la lámina alejado de sus bordes, la magnitud, dirección y sentido del campo son los mismos. En (d) ocurre lo mismo en la región entre las láminas, y en el exterior el campo es débil. Mientras menor sea la distancia entre las dos láminas comparada con sus dimensiones, más débil será el campo en el exterior de ellas.

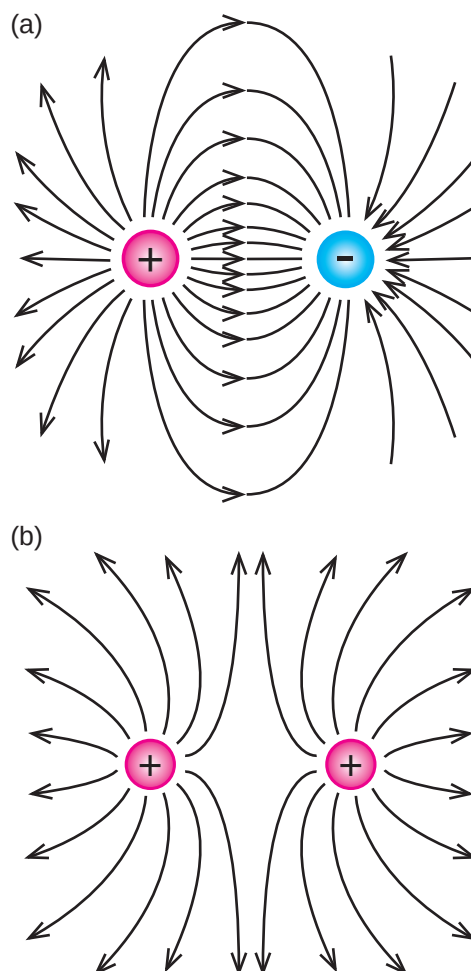
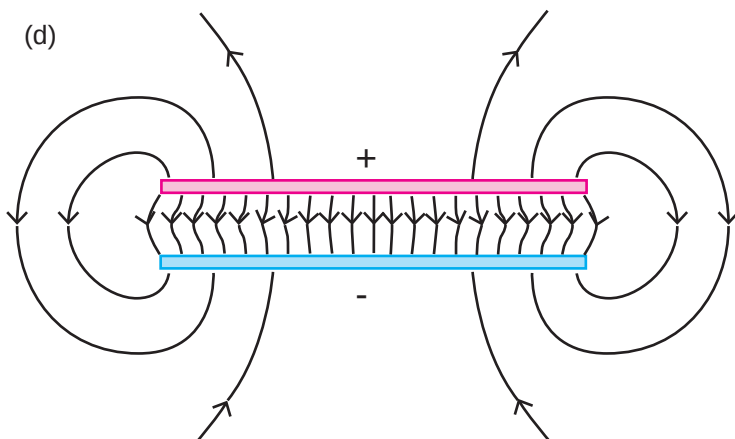
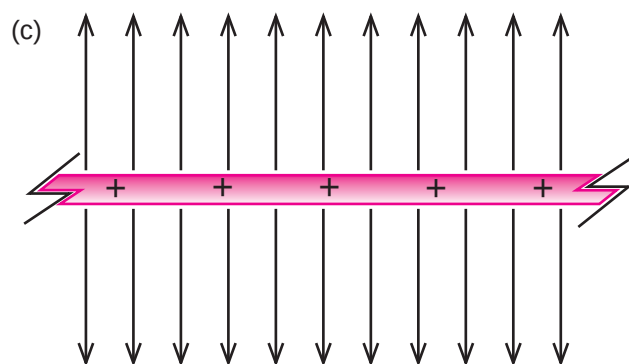


Fig. 1.23. Líneas de campo eléctrico correspondientes a: (a) dos partículas con cargas de igual magnitud y diferente signo, (b) dos partículas con cargas de igual magnitud y signo, (c) lámina extensa con carga positiva, (d) dos láminas extensas paralelas entre sí, con cargas de igual magnitud y diferente signo.



Que las líneas del campo sean perpendiculares a la lámina cargada de la figura 1.23c parece razonable, pero me resulta difícil aceptar que la magnitud del campo no disminuya con la distancia a la lámina.

El campo cuya magnitud, dirección y sentido son los mismos en todos los puntos del espacio se denomina **homogéneo**.

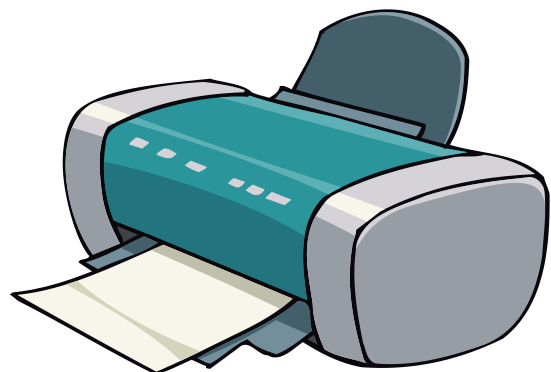
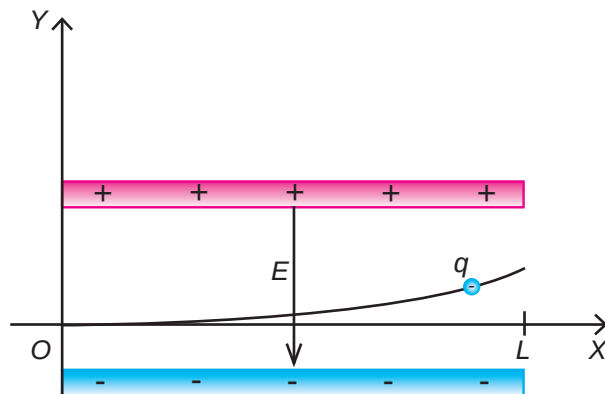
Si disminuyera, entonces las líneas estarían separadas unas de otras al alejarse de la lámina, pero si la extensión de ésta es infinita, ello es imposible.



A partir del diagrama de líneas de campo para una lámina extensa cargada (1.23 c), ¿podrías argumentar el hecho de que en el exterior de un sistema formado por dos láminas con cargas de igual magnitud y signos contrarios, el campo es nulo?

Ejemplo 1.8. En una impresora de “chorro de tinta”, mediante un campo eléctrico entre dos placas paralelas horizontales se dirigen con gran precisión minúsculas gotas de tinta hacia el papel, a fin de formar cada uno de los caracteres. Una letra típica requiere unas 100 gotitas, pero las impresoras modernas pueden producir más de 100 000 cada segundo. Imagina que una gota de masa 1.0×10^{-10} kg, con carga de 1.2×10^{-13} C, penetra en el campo homogéneo entre las placas, de intensidad 1.5×10^6 N/C, con una velocidad inicial horizontal dirigida a lo largo de ellas de 15 m/s. La longitud de las placas es 1.5 cm. a) ¿Qué tiempo demora la gota en salir del campo entre las placas? b) Halla la fuerza eléctrica que actúa sobre la gota y compárala con la fuerza de gravedad sobre ella. d) ¿Qué desviación vertical ha experimentado al salir del campo?

A continuación hemos dibujado un esquema de la situación descrita.





Puesto que la gota representada tiene carga negativa, está sometida a una fuerza eléctrica de sentido contrario a la intensidad del campo. Ya que el campo es homogéneo, dicha fuerza es constante durante todo el movimiento de la gota. El movimiento puede por tanto imaginarse como una composición de dos movimientos rectilíneos, uno según X, con velocidad constante y otro según Y, con aceleración constante.

a) Para hallar el tiempo t empleado por la partícula en recorrer la distancia horizontal L y salir del campo, utilizamos la ecuación del movimiento uniforme:

$$v_x = \frac{L}{t}$$

$$\text{de donde, } t = \frac{L}{v_x} = \frac{1.5 \times 10^{-2} \text{ m}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.0010 \text{ s}$$

b) La magnitud de la fuerza eléctrica que actúa sobre la partícula es:

$$F = qE = (1.2 \times 10^{-13} \text{ C}) \left(1.5 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 1.8 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Por su parte, la fuerza de gravedad sobre la partícula es:

$$F_g = mg = (1.0 \times 10^{-10} \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 9.8 \times 10^{-10} \text{ N}$$

De modo que:

$$\frac{F}{F_g} = \frac{1.8 \times 10^{-7} \text{ N}}{9.8 \times 10^{-10} \text{ N}} = 184$$

Como puedes ver, pese a que la fuerza eléctrica es muy pequeña comparada con las fuerzas que nos relacionamos habitualmente, de todos modos es mucho mayor que la de gravedad, unas 184 veces mayor.

c) El desplazamiento vertical de la gota es $\Delta y = \frac{1}{2} a_y t^2$, donde t es el tiempo que demora en salir del campo, hallado ya en el apartado (a). Al calcular la aceleración a_y no tendremos en cuenta la fuerza de gravedad, ya que es pequeña comparada con la fuerza eléctrica. Por tanto:

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{1.8 \times 10^{-7} \text{ N}}{1.0 \times 10^{-10} \text{ kg}} = 1.8 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

De aquí que:

$$\Delta y = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} \left(1.8 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0.001 \text{ s})^2 = 9.0 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.90 \text{ mm}$$

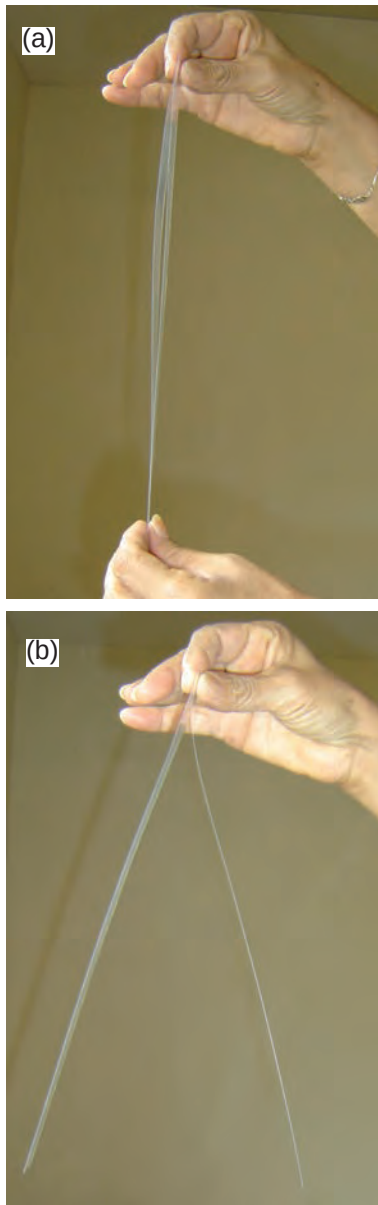


Fig. 1.24. a) Energía potencial eléctrica debida a la interacción entre dos tiras de acetato: (a) las tiras con cargas de igual signo se sostienen unidas, (b) al soltar las tiras, ellas se separan, poniendo de manifiesto que poseían energía debida a la interacción eléctrica.

1.2.6. Potencial y diferencia de potencial

1.2.6.1. Energía potencial eléctrica

Si dos tiras de acetato con cargas de igual signo se sostienen verticalmente manteniéndolas unidas por ambos extremos (Fig. 1.24a) y luego se suelta el extremo inferior, ellas se separan por sí solas (Fig.1.24b). Esto pone de manifiesto que el sistema de las dos tiras poseía energía debido a la interacción eléctrica entre ellas. La fuerza de interacción eléctrica, como la de interacción gravitatoria, es **conservativa**, por lo que puede asociársele cierta **energía potencial**.

Un sistema de cuerpos electrizados posee energía potencial debido a la interacción eléctrica entre ellos, denominada *energía potencial eléctrica*.

La energía de interacción entre los electrones y los núcleos atómicos y entre los átomos que forman las moléculas (la denominada energía química), es esencialmente eléctrica. Puesto que en los núcleos atómicos los protones se encuentran muy próximos entre sí, la energía de interacción eléctrica entre ellos es enorme. Precisamente parte de esa energía es la que se transforma en energía térmica en los reactores nucleares.

En Electricidad, lo mismo que en Mecánica, el concepto de energía potencial facilita el análisis de muchas situaciones. Como recordarás, la expresión de la energía potencial está determinada por la expresión de la fuerza. Así, por ejemplo, la fuerza gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra es $F_g = mg$ y la energía potencial gravitatoria mgy ; la fuerza elástica es $F = -kx$ y la energía potencial elástica $\frac{1}{2}kx^2$. Como estudiaste en Mecánica, la expresión de la energía potencial asociada a una fuerza puede obtenerse teniendo en cuenta que el trabajo realizado por la fuerza es de igual magnitud y signo opuesto que la variación de energía potencial:

$$W_{FC} = -\Delta E_p$$



Nos limitaremos a hallar la expresión de la energía potencial eléctrica en una situación muy simple, cuando se tiene una partícula cargada en un **campo eléctrico homogéneo**, digamos, entre dos láminas extensas con cargas de signos contrarios (Fig.1.23c). En ese caso, como sabes, la fuerza que actúa sobre la partícula es constante.

Consideremos las dos láminas (Fig. 1.25) y elijamos el origen de la coordenada X sobre la lámina negativa. Supongamos ahora que se tiene una partícula con carga positiva en el punto 1 y determinemos el trabajo realizado por el campo cuando se desplaza hasta el punto 2, sobre la lámina negativa. En este caso el trabajo se halla simplemente multiplicando los módulos de la fuerza y el desplazamiento:

$$W_{Fe} = Fx = qEx$$

Por su parte, la variación de la energía potencial es:

$$\Delta E_p = E_p(0) - E_p(x)$$

siendo $E_p(x)$ la energía potencial cuando la partícula está en la posición x y $E_p(0)$ cuando está en el origen de coordenada. En consecuencia, se tiene:

$$qEx = -[E_p(0) - E_p(x)] = E_p(x) - E_p(0)$$

Resolviendo para $E_p(x)$:

$$E_p(x) = qEx + E_p(0)$$

Como puedes apreciar, el valor de la energía potencial cuando la partícula está en la posición x depende no solo de dicha posición, sino también del valor que tenga la energía potencial en cierto punto, por ejemplo en el origen de coordenada. Sin embargo, del curso de Mecánica ya sabes que **cundo se trata de la energía potencial, lo importante son sus variaciones**. De modo similar que el origen de coordenada, **el nivel cero de energía potencial se escoge donde más convenga**. Así, en el caso que estamos examinando, si elegimos el nivel cero en el origen de coordenada, es decir, sobre la lámina negativa, se tiene

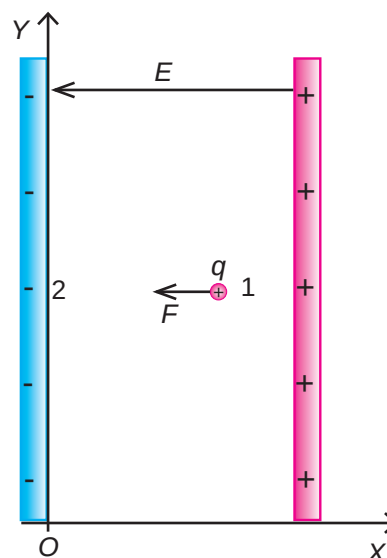


Fig. 1.25. Partícula con carga positiva que se desplaza en el campo eléctrico homogéneo entre dos placas con cargas de signos opuestos.

En la figura 1.25, ¿será positivo o negativo el trabajo realizado por el campo sobre la partícula? Argumenta.





$E_p(0) = 0$, y la expresión de la energía potencial queda, sencillamente:

$$E_p(x) = qEx$$

Tal vez a primera vista no te percastes del parecido entre esta ecuación y la de la energía potencial gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra, $E_p(y) = mgy$, utilizada en el curso de Mecánica, pero si la examinas detenidamente verás que son similares. El lugar de la masa m ahora lo ocupa la carga q , el de la intensidad de la gravedad g , lo ocupa la intensidad del campo eléctrico y el de la posición y lo ocupa la posición x . La similitud te parecerá todavía mayor si giras el libro un ángulo de 90° en sentido contrario al de las manecillas de un reloj. La situación recuerda el caso de una partícula que cae desde cierta altura bajo la acción de la fuerza de gravedad. Sin embargo, a diferencia de la masa m la carga q puede ser tanto positiva como negativa. Si la partícula colocada entre las placas fuese negativa en lugar de positiva, entonces la expresión de la energía potencial sería:

$$E_p(x) = -qEx$$

En la figura 1.25, ¿aumenta o disminuye la energía potencial cuando la partícula se desplaza de 1 a 2?, ¿y si la carga de la partícula fuese negativa? Argumenta.



¿Cuál sería la analogía gravitatoria de una partícula con carga positiva moviéndose entre las placas de la figura 1.25 en sentido contrario a la intensidad de campo $\vec{E}$?



Ejemplo 1.9. Imagina que la intensidad del campo eléctrico entre las placas representadas en la figura 1.25 es $1.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ y la distancia entre ellas 1.0 cm . Si de la placa negativa se desprende un electrón, ¿con qué velocidad llegará a la placa positiva?

Nota que como la masa del electrón es extremadamente pequeña, la fuerza de gravedad sobre él es insignificante comparada con la eléctrica, por lo que el electrón se moverá hacia la placa positiva siguiendo la dirección de las líneas del campo. No es necesario tener en cuenta la energía potencial gravitatoria. El aumento de su energía cinética se realiza por cuenta de la disminución de la energía potencial eléctrica del sistema:

$$\Delta E_C = -\Delta E_P$$

Si elegimos el origen de la coordenada x en la placa negativa y el nivel cero de energía potencial eléctrica sobre ella, entonces la expresión de la energía potencial es:

$$E_P = -qEx$$

El signo menos se debe a que se trata de un electrón, que posee carga negativa.

Por consiguiente:

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = -(-qEx - 0) = qEx$$

Resolviendo para v :

$$v^2 = \frac{2qEx}{m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2qEx}{m}} = \sqrt{\frac{2(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})\left(1.0 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}\right)(1.0 \times 10^{-2} \text{ m})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 5.9 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



1.2.6.2. Potencial eléctrico

El ejemplo anteriormente considerado muestra que la energía potencial de una partícula en un campo eléctrico depende de la intensidad $\vec{E}$ del campo y de la carga q de la partícula. Pero si se divide la energía potencial entre la carga de la partícula, es decir, si se halla la **energía potencial por unidad de carga**, entonces la nueva magnitud que resulta es **independiente de la carga de la partícula**, solo depende del campo en el punto dado. Así, por ejemplo, en el caso de la partícula cargada entre las dos placas paralelas (Fig. 1.25), la energía potencial por unidad de carga es:

$$\frac{E_p}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$$

Como puedes ver, en este resultado no aparece la carga q de la partícula que se coloca en el campo.

Por consiguiente, para caracterizar el campo eléctrico, además de la intensidad $\vec{E}$ de campo se dispone de otra magnitud, la energía potencial por unidad de carga.

La energía potencial por unidad de carga en un punto dado del campo eléctrico se denomina *potencial eléctrico*, o simplemente *potencial*:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Ambas magnitudes, $\vec{E}$ y V caracterizan al campo, pero mientras que la primera es un vector, la segunda es un escalar y mientras que la primera caracteriza a la **fuerza** por unidad de carga ejercida por el campo, la segunda caracteriza a la **energía** por unidad de carga.

1.2.6.3. Diferencia de potencial

De modo similar que la energía potencial, el potencial V en un punto dado del campo depende de dónde se haya elegido el nivel cero para calcularlo. Pero también como

en el caso de la energía potencial, **lo importante no es el potencial en sí mismo, sino su variación ΔV entre dos puntos**, la cual no depende de dónde se haya escogido el nivel cero.

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{E_{P2}}{q} - \frac{E_{P1}}{q} = \frac{E_{P2} - E_{P1}}{q} = \frac{\Delta E_P}{q}$$

es decir:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q}$$

En palabras:

La *diferencia de potencial* (también denominada *tensión y voltaje*) entre dos puntos del campo es igual a la *variación de la energía potencial por unidad de carga* que tiene lugar al *desplazar una partícula cargada entre los puntos*.

Teniendo en cuenta que el trabajo realizado por el campo es $W_{Fe} = -\Delta E_P$, la diferencia de potencial con frecuencia también se escribe:

$$\Delta V = \frac{W_{Fe}}{q}$$

A modo de ejemplo hallemos la expresión de la diferencia de potencial entre dos placas paralelas con cargas de signo contrario (Fig. 1.26). Como hemos visto, la energía potencial al colocar una partícula de carga q en el campo entre las placas es $E_P = qEx$, por lo que la diferencia de potencial $V_B - V_A$ entre las placas es igual a la variación de energía potencial por unidad de carga al desplazar la partícula de 1 a 2:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q} = \frac{E_{P2} - E_{P1}}{q} = \frac{qEd - 0}{q} = Ed$$

donde d es la separación entre las placas.

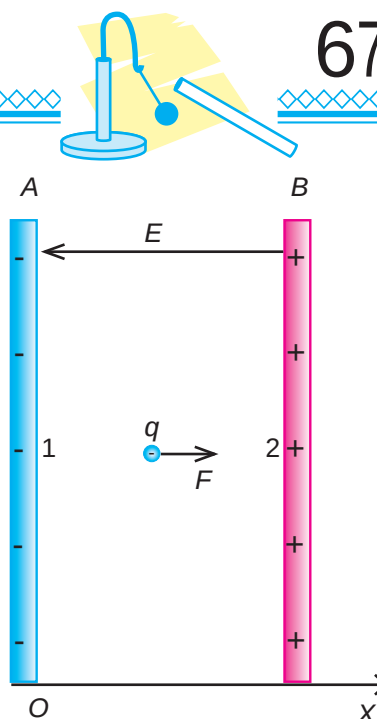


Fig. 1.26. La diferencia de potencial $V_B - V_A$ entre las placas representadas es igual a la variación de energía potencial por unidad de carga al desplazar la partícula cargada de 1 a 2.

En el texto se halló la diferencia de potencial $V_B - V_A$ para las placas de la figura 1.26. ¿Y cuál será la diferencia de potencial $V_A - V_B$?





Alessandro Volta (1745-1827). Profesor de Física y gran experimentador italiano. Es conocido, sobre todo, por la invención en 1800 del primer generador de corriente eléctrica continua, la pila voltaica.

También podía haberse hallado la diferencia de potencial a partir de la ecuación en que interviene el trabajo realizado por el campo. Así, al desplazar la partícula de 1 a 2, dicho trabajo es $W_{Fe} = -qEd$, por lo que al sustituir este resultado en la ecuación se tiene:

$$\Delta V = -\frac{W_{Fe}}{q} = -\frac{-qEd}{q} = Ed$$

Puesto que tanto el potencial como la diferencia de potencial representan energía por unidad de carga, la unidad del sistema internacional en que se miden es el **joule sobre coulomb** (J/C). Esta unidad recibe un nombre especial, **volt**, o **voltio** (V), en honor a Alessandro Volta, quien en el año 1800 inventó el primer generador de corriente continua.

Utilizando el *voltio*, es posible expresar la unidad de intensidad de campo eléctrico ya conocida, N/C, de otro modo. Así, puesto que:

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} \text{m}, \text{ se tiene que: } 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

De modo que es equivalente expresar la intensidad de campo eléctrico en N/C o en V/m.

Ejemplo 1.10. Luego de frotar fuertemente con papel una regla plástica, se colocó paralela a una superficie metálica plana y se aproximó poco a poco a ella. Cuando la distancia era de 0.5 cm, saltó una chispa entre las superficies. Considera que el campo entre ellas era homogéneo. a) Estima la intensidad del campo eléctrico entre las superficies. b) Halla la diferencia de potencial entre ellas.

a) Según la tabla 1.2, para que ocurra una descarga eléctrica entre las superficies la intensidad del campo debe ser por lo menos de $3 \times 10^6 \text{ N/C}$ (o V/m).

b) Como se supone que el campo entre las superficies es homogéneo, entonces la diferencia de potencial es $\Delta V = Ed$, donde d es la distancia entre las superficies. Por tanto, la diferencia de potencial es, por lo menos:

$$\Delta V = Ed = \left(3 \times 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)(0.5 \times 10^{-2} \text{ m}) = 1.5 \times 10^4 \text{ V}$$



1.2.7. Conductores y dieléctricos en un campo electrostático

1.2.7.1. Conductores en un campo electrostático

En el apartado 1.2.2, al explicar cómo se origina la atracción entre un cuerpo electrizado y un cuerpo metálico neutro, ya mencionamos que en los metales, los electrones más exteriores de los átomos han perdido sus enlaces con átomos determinados y no pertenecen a ninguno en particular, se mueven libremente en todas direcciones dentro de una red formada por átomos ionizados positivamente. Por supuesto, tanto los electrones como los iones producen campos eléctricos, pero sus intensidades se compensan mutuamente, dando por resultado una **intensidad de campo eléctrico en el interior del conductor nula**. Pero, ¿y si el conductor se coloca en un campo eléctrico externo? Cuando se introduce un conductor metálico en un campo

eléctrico (Fig. 1.26), los electrones comienzan a moverse en sentido contrario al de las líneas del campo, produciéndose un exceso de ellos en un lado del conductor y un defecto en el lado opuesto. Esto origina un campo eléctrico adicional en el interior del conductor, de sentido opuesto al campo externo, cuya intensidad crece con la acumulación de electrones en un lado del conductor y la carencia en el otro. Este proceso tiene lugar hasta que la magnitud del campo eléctrico originado por este desplazamiento de los electrones se iguala a la del campo externo, con lo cual **la intensidad de campo eléctrico resultante en el interior del conductor se hace nula**. El tiempo que dura el proceso de redistribución de los electrones es del orden de 10^{-16} s, por lo que desde el punto de vista práctico puede considerarse que al introducir el conductor en el campo, se alcanza la situación de equilibrio instantáneamente. **El resultado es el mismo si el conductor que se coloca en el campo no es neutro, sino que está cargado.**

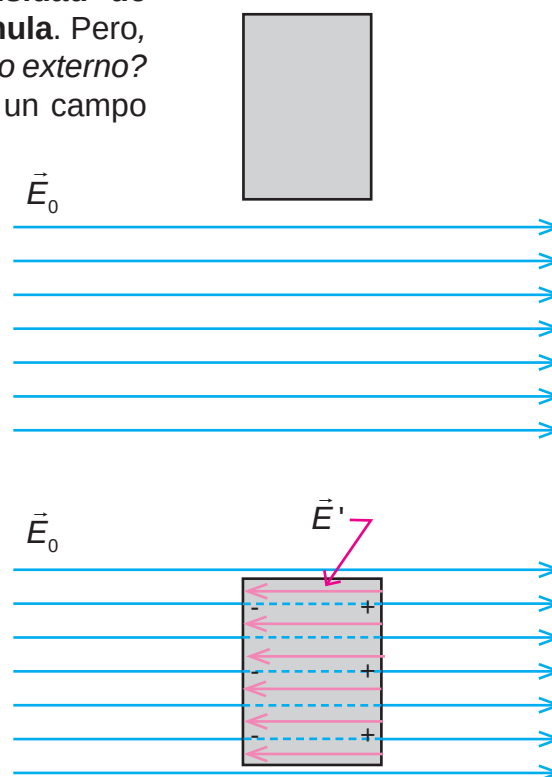


Fig. 1.26. Al introducir una lámina metálica en un campo eléctrico $\vec{E}_0$, se origina un campo eléctrico adicional $\vec{E}'$ que lo compensa, dando por resultado un campo resultante de intensidad nula en el interior de la lámina.

Esclarece por qué si la intensidad del campo eléctrico en el interior de un conductor colocado en un campo eléctrico externo no fuese nula, se violaría la ley de conservación de la energía.



En realidad, un simple razonamiento lleva a la conclusión que la intensidad del campo en el interior de un conductor en un campo eléctrico tiene que ser nula: de no ser así, habría una corriente eléctrica permanente en el conductor, lo que violaría la ley de conservación de la energía. Por igual razón, podemos estar seguros que **las líneas de campo eléctrico fuera del conductor son, en los puntos de contacto con su superficie, perpendiculares a ella**. De lo contrario la intensidad de campo tendría una componente paralela a la superficie que originaría una corriente permanente.

Las conclusiones anteriores son válidas no solo para un conductor macizo, sino también hueco, como por ejemplo, un cascarón. En resumen:

Si un conductor, ya sea neutro o cargado, macizo o hueco, se coloca en un campo eléctrico, la intensidad del campo en su interior es nula y en el exterior las líneas del campo son perpendiculares a la superficie en los puntos de contacto con ella. (Fig. 1.27).



Razonamientos análogos a los anteriores conducen a que **en un conductor electrizado la carga (el exceso o defecto de partículas eléctricas de determinado signo) se distribuye en la superficie, y el interior permanece neutro**.

Argumenta desde el punto de vista microscópico, porqué la carga de un conductor electrizado se distribuye en su superficie.

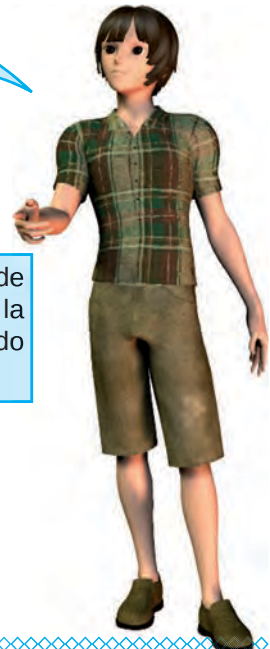


Fig. 1.27. Anillo y lámina, ambos conductores, con cargas eléctricas de diferentes signos. En el interior del anillo no hay líneas de campo, lo que indica que su intensidad es nula. Las líneas de campo son perpendiculares a las superficies de los conductores.



El hecho de que en el interior de los conductores huecos el campo electrostático sea nulo, se emplea en la denominada **protección electrostática**. Así, para que ciertos dispositivos, como por ejemplo, discos duros y memorias, no sean dañados por campos eléctricos, suelen empacarse en bolsas metálicas. En el interior de la bolsa la intensidad del campo siempre es cero. Al hacer referencia a casos como éstos suele decirse que los dispositivos se han colocado en un “cubo, o jaula de Faraday”, ya que fue Michael Faraday el primero en realizar experimentos a fin de comprobar que en el interior de un conductor la intensidad del campo es nula. Faraday construyó una gran caja cubierta de metal, la colocó sobre soportes aislantes y se introdujo en ella con diversos dispositivos. Pese a que la caja fue tan intensamente cargada que de su exterior saltaban chispas, le fue imposible detectar la presencia de campo eléctrico en su interior. En la figura 1.28 se muestra una versión moderna del experimento.



Fig. 1.28. Versión moderna de la “Jaula de Faraday”.

Lo dicho acerca del campo en un conductor lleva a la conclusión de que en el caso de una esfera conductora con carga, hueca o maciza, las líneas de campo en su exterior, por ser perpendiculares a su superficie, son radiales (Fig. 1.29). Y esto a su vez sugiere, que la intensidad de campo en su exterior es como la de una partícula de igual carga que la esfera, situada en el lugar que ocupa su centro.

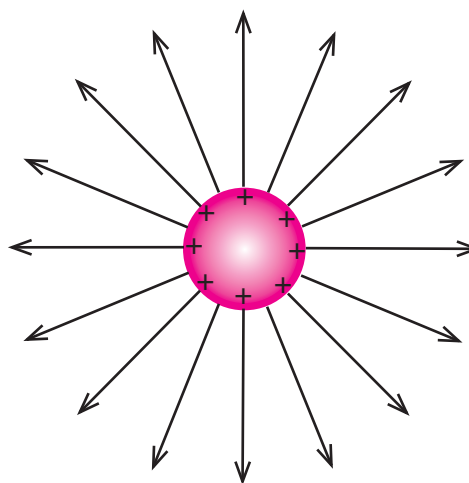


Fig. 1.29. En una esfera conductora, hueca o maciza, la carga se distribuye uniformemente en su superficie. Las líneas de campo son radiales.



¿Por qué en el interior de la esfera de la figura 1.29 no se han dibujado líneas de campo?

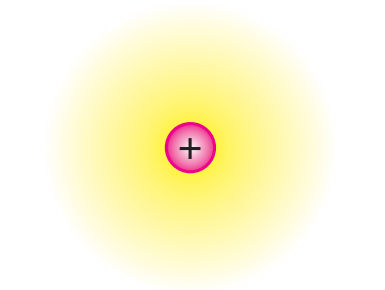


Fig. 1.30. Esquema de un átomo neutro. Los electrones forman una nube, de carga negativa, en torno al núcleo con carga positiva. Los centros de carga negativa y positiva coinciden.

¿Qué sucede con la polarización de un dieléctrico polar si: a) aumenta la intensidad del campo eléctrico externo, b) aumenta la temperatura?



1.2.7.2. Aisladores en un campo electrostático

En los aisladores, comúnmente denominados en Física **dieléctricos**, los electrones están fuertemente enlazados a los átomos. Por eso, a diferencia de lo que ocurre en los conductores, no pueden moverse libremente entre las moléculas, o átomos. Se distinguen dos tipos de dieléctricos: **polares** y **no polares**.

1.2.7.2.1. Dieléctricos polares

Como sabes del curso de Química, en los átomos los electrones pueden ser representados por una nube de carga negativa en torno al núcleo con carga positiva (Fig.1.30). Los centros de carga negativa y positiva coinciden y el átomo en conjunto es neutro.

Sin embargo, cuando los átomos forman moléculas, en muchos casos la distribución de la carga eléctrica deja de ser simétrica y los centros de carga negativa y positiva de la molécula no coinciden. Se dice entonces que la molécula es un **dipolo eléctrico** y que el dieléctrico es un **dieléctrico polar**. Ejemplos de moléculas polares son la de agua y las de los alcoholes.

En un dieléctrico polar las moléculas están orientadas caóticamente (Fig. 1.31a) y por eso, en cada porción suya que contenga gran número de ellas la carga eléctrica en promedio es nula, el dieléctrico es neutro. Por igual razón, la intensidad de campo eléctrico en el interior del dieléctrico en promedio también es nula. Pero si el dieléctrico se coloca en un campo eléctrico (Fig. 1.31b), entonces dicho campo actúa sobre cada una de sus moléculas con dos fuerzas, una sobre su parte negativa y otra sobre la positiva. Estas fuerzas producen un **momento de fuerza** que tiende a orientar los dipolos en la dirección del campo. Como resultado de esto, aunque ligada a las moléculas, en la superficie del dieléctrico aparece cierta carga eléctrica. Así, en la figura 1.31b, en la superficie del dieléctrico que está a la derecha prevalece la carga positiva y en la que está a la izquierda, la negativa.

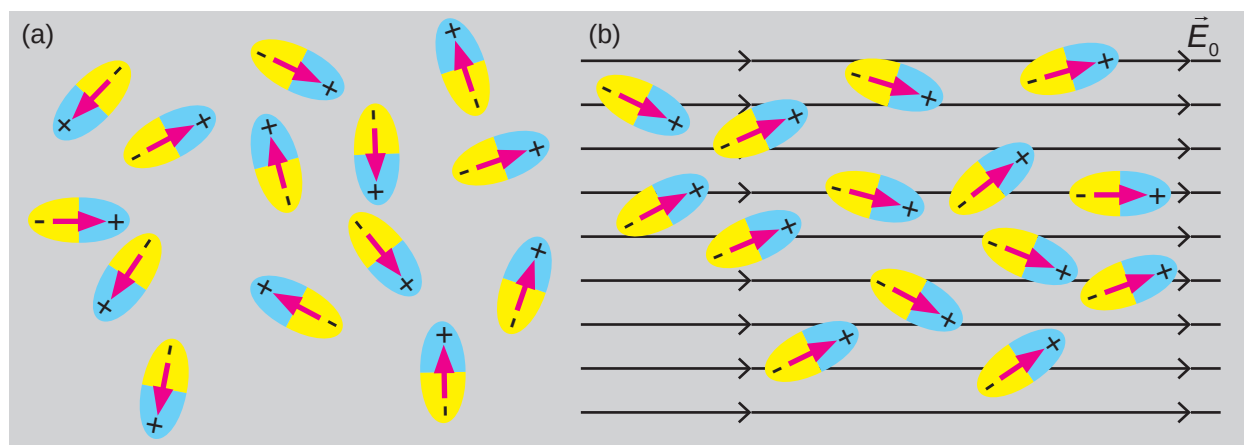


Fig. 1.31. Esquema de las moléculas en un dieléctrico polar. (a) Las moléculas están orientadas caóticamente. (b) Al colocar el dieléctrico en un campo eléctrico, sus moléculas tienden a orientarse en la dirección del campo. En la superficie del dieléctrico, que está a la derecha, prevalece la carga positiva y en la que está a la izquierda, la negativa.

1.2.7.2.2. Dieléctricos no polares

Los **dieléctricos no polares** están constituidos por átomos o moléculas en que los centros de las distribuciones de carga negativa y positiva coinciden. Pero al ser introducidos en un campo eléctrico sus átomos o moléculas se deforman, polarizándose (Fig. 1.32a). Ejemplos de estos dieléctricos son los gases inertes, el oxígeno, el hidrógeno y el polietileno. Los átomos o moléculas polarizados por el campo se orientan en la dirección de éste (Fig. 1.32b) y, como en los dieléctricos polares, en la superficie de uno de los lados del dieléctrico predomina la carga eléctrica positiva, mientras que en la opuesta, la negativa.

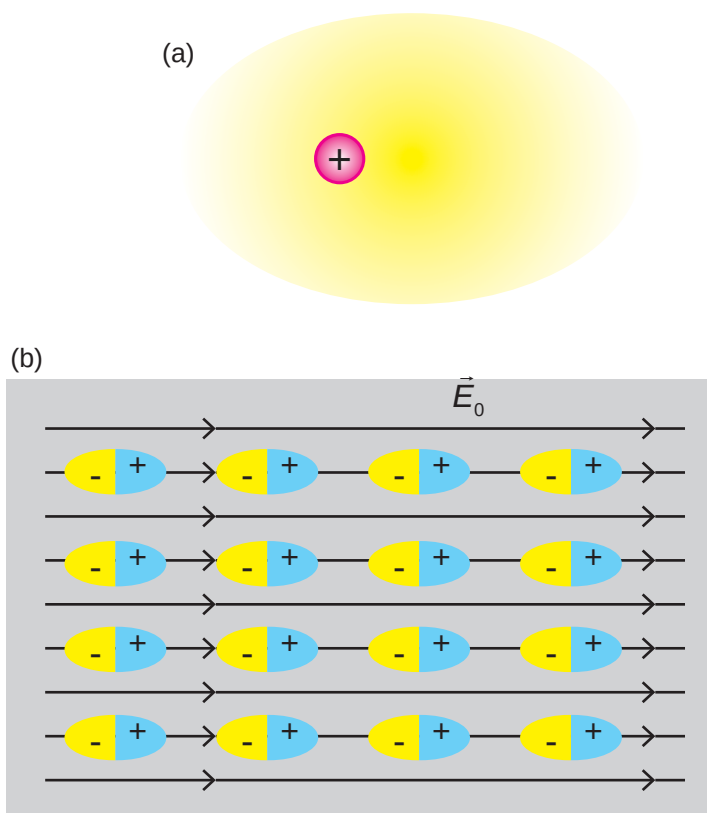


Fig. 1.32. a) Cuando un átomo es sometido a un campo eléctrico, la nube electrónica que rodea el núcleo se distorsiona y los centros de carga negativa y positiva ya no coinciden. b) Los átomos o moléculas polarizados se orientan en la dirección del campo.



Las cargas eléctricas que aparecen en las superficies opuestas de ambos tipos de dieléctricos al ser colocados en un campo eléctrico, originan una intensidad de campo $\vec{E}'$ contraria a la intensidad $\vec{E}_0$ del campo externo. Como consecuencia de esto, la intensidad resultante del campo en el interior del dieléctrico disminuye ($E = E_0 - E'$). El grado en que disminuye depende del dieléctrico y se mide por medio de una magnitud denominada **constante dieléctrica** (ϵ):

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

¿A qué se deberá que a 25° C el agua tiene menor constante dieléctrica que a 20° C?



En la tabla 1.3 se dan los valores de las constantes dieléctricas de algunos materiales. También aparece la **rigidez eléctrica**, que es una medida del valor máximo de la intensidad de campo que puede soportar el dieléctrico antes de que ocurra su “ruptura”, es decir, que deje conducir.

Lo anterior significa que las ecuaciones hasta ahora obtenidas deben ser modificadas cuando se trata de cuerpos electrizados colocados en determinado medio y no en el aire. Así, la magnitud del campo eléctrico de una partícula con carga situada en un medio distinto del aire, será ϵ veces menor que en éste y, por tanto, la ecuación para calcularla:

$$E = \frac{k \frac{q}{r^2}}{\epsilon} = \frac{kq}{\epsilon r^2}$$

La fuerza de interacción eléctrica ejercida entre dos partículas con carga situadas en un dieléctrico también decrece ϵ veces, debido a la disminución de la intensidad del campo. Por eso la expresión general de la ley de Coulomb es:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

La fuerza de interacción eléctrica entre dos cuerpos cargados, a diferencia de la fuerza de interacción gravitatoria, depende, pues, de las propiedades del medio en el cual se encuentran los cuerpos.



Tabla 1.3. Constante dieléctrica y rigidez eléctrica de algunos materiales.

Material	Constante ϵ	Rigidez eléctrica (V/m)
Aire seco	1.00054	3×10^6
Bakelita	4.9	24×10^6
Poliestireno	2.6	24×10^6
Papel	3.5	16×10^6
Vidrio Pyrex	4.7	14×10^6
Porcelana	6	10×10^6
Etanol	25	- - - -
Agua a 20°C	80.4	- - - -
Agua a 25°C	78.5	- - - -
Titanato de estroncio	300	8×10^6

¿Qué valor podría asignarse a la constante dieléctrica de un metal?



1.2.8. Capacidad eléctrica y condensadores

En muchas situaciones prácticas, como por ejemplo, al poner en funcionamiento motores eléctricos, al utilizar el flash de una cámara fotográfica, al hacer funcionar un desfibrilador en una ambulancia, o en aceleradores de partículas (Fig. 1.33), se requieren dispositivos que acumulen gran cantidad de carga eléctrica. La cuestión básica que abordaremos en este apartado es:

¿Bajo qué condiciones es posible acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?

La función de acumular carga puede ser desempeñada por los **condensadores**, también denominados **capacitores**. Independientemente del procedimiento empleado, para acumular carga en un cuerpo necesariamente hay que transferir carga a otro. Y esto es lo que se hace en los condensadores.

Fig. 1.33. a) Condensador de un motor eléctrico que facilita su puesta en marcha, b) Desfibrilador de una ambulancia que utiliza la energía acumulada en condensadores. c) Banco de condensadores que almacena energía eléctrica para ser utilizada en el acelerador de partículas de FermiLab.

(a)



(b)



(c)



En general, un **condensador** es un sistema de dos conductores aislados del exterior, de uno de los cuales se ha transferido carga al otro.

Un ejemplo clásico y muy simple es el formado por dos láminas metálicas situadas una frente a otra (Fig. 1.34a). Precisamente el símbolo utilizado para representar a los condensadores corresponde a este caso. Y uno de los procedimientos más comunes de trasladar electrones de una de las láminas a la otra, consiste en utilizar un circuito formado por una batería y un interruptor (Fig. 1.34b). Al cerrar el interruptor la batería carga las láminas y, al abrirlo, éstas quedan aisladas de la batería.

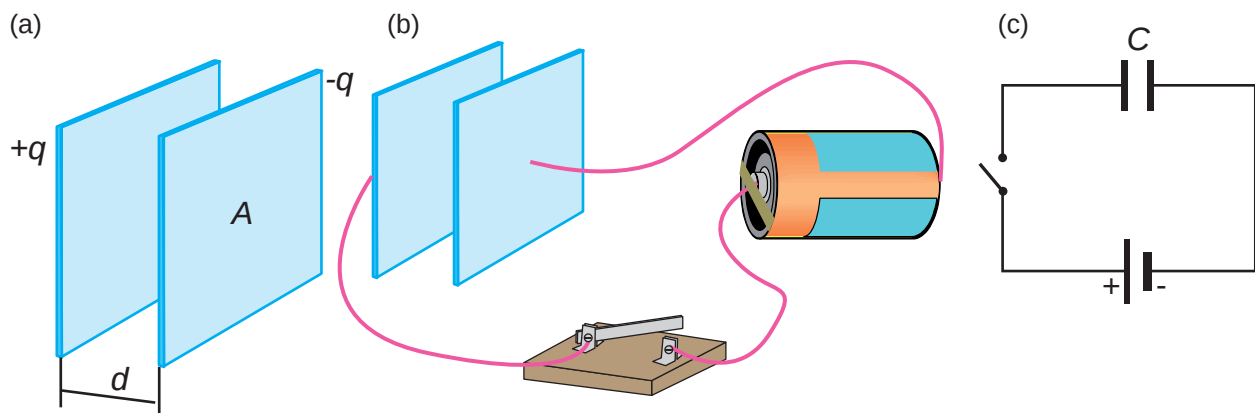


Fig. 1.34. (a) Condensador simple formado por dos láminas metálicas aisladas del exterior, de una de las cuales se han pasado electrones a la otra (b) Uno de los procedimientos más comunes de cargar un condensador es utilizando una batería. (c) Diagrama del circuito.

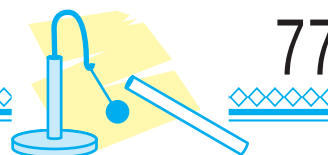


Nota que una lámina se carga negativamente y la otra positivamente, pero que la magnitud de la carga de cada una es la misma. Como no hay que distinguir entre la magnitud de la carga de una lámina y la otra, al referirse a ella sencillamente se habla de “la carga del condensador”.

¿En qué ley se fundamenta la afirmación del texto de que la magnitud de la carga eléctrica de las láminas de la figura 1.34 es la misma? Explica.

Experimentalmente se encuentra que la magnitud de la carga q de un condensador es proporcional a la diferencia de potencial ΔV entre sus láminas:

$$q = C\Delta V$$



La constante C solo depende de las características del condensador: forma de los conductores, distancia que los separa, dieléctrico entre ellos. Dicha constante se denomina **capacidad del condensador** y expresa la **carga eléctrica por voltio que puede acumular**.

De este modo, **la capacidad eléctrica de un condensador es igual al cociente entre su carga y la diferencia de potencial entre sus terminales:**

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

En realidad, lo más probable es que un sistema de dos láminas como el de la figura 1.34, colocado sobre una mesa, no pueda considerarse aislado. Posiblemente sus láminas cargadas interaccionen eléctricamente con los objetos que las rodean, lo cual modificaría la capacidad eléctrica del sistema cada vez que variaran dichos objetos. Pero la distancia entre las láminas de los condensadores empleados en la práctica son mucho menores que la del condensador de la figura. Por eso, si bien entre sus láminas la intensidad del campo es considerable, en el exterior es prácticamente nula y su interacción con los objetos que lo rodean es despreciable, comportándose como aislado.

Según la ecuación $C = q / \Delta V$, la unidad de capacidad eléctrica es 1 coulomb / volt (1 C/V). Dicha unidad recibe el nombre especial de **farad**, o **faradio** (F), en honor a Michael Faraday, quien fue el primero en investigar sobre los condensadores.

Puesto que un faradio es 1 C / 1 V y una carga de 1 C es, como sabes, muy grande, entonces el faradio también es una unidad relativamente grande. Por eso en la práctica es muy usual utilizar submúltiplos de ella, por ejemplo, el microfaradio (μF) que es 1×10^{-6} F y el picofaradio (pF), que es 1×10^{-12} F.

Ahora retomaremos la cuestión básica de este apartado: ¿Bajo qué condiciones es posible acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?



¿Y que sucede con la capacidad del condensador de la figura 1.34 si sus láminas se acercan después de haberlo desconectado de la batería? Argumenta.



Ante todo nota que como para un condensador determinado C es constante, entonces según la ecuación $C = q / \Delta V$, **aumentando la diferencia de potencial ΔV** puede aumentarse su carga.

Por otra parte, la carga que es capaz de almacenar un condensador de láminas para un voltaje dado, depende del **área** de las láminas, de la **separación** que tienen y del **dieléctrico** entre ellas.

Así, intuitivamente se comprende que mientras mayor sea el área de las láminas del condensador de la figura 1.34, mayor será la carga que puede almacenar. Además, si manteniendo conectado el condensador a la batería, las láminas se acercan entre sí, la intensidad del campo entre ellas aumenta. En efecto, según la ecuación $\Delta V = Ed$, si ΔV se mantiene constante, entonces al disminuir d aumenta E . Y el aumento de E significa que la carga del condensador aumenta.

Los cálculos muestran que, en efecto, la capacidad de un condensador de láminas -o sea, la carga eléctrica que puede almacenar por cada voltio de diferencia de potencial entre sus placas- es:

$$C = \frac{1}{4\pi k} \frac{A}{d}$$

donde k es la constante que interviene en la ley de Coulomb (constante de Coulomb), A el área de las láminas y d la distancia entre ellas.

Por último, veamos cómo un dieléctrico situado entre las láminas del condensador modifica su capacidad. Recordemos que al colocar un dieléctrico entre dos láminas paralelas con carga eléctrica, el campo en su interior disminuye ϵ veces. Por consiguiente, si manteniendo el condensador de la figura 1.34 conectado a la batería se coloca un dieléctrico que llene todo el espacio entre sus láminas, por ejemplo un bloque de poliestireno, la carga de las láminas aumenta hasta que la intensidad del campo vuelve a ser la misma que antes de introducir el dieléctrico. Dicho de otro modo, como $\Delta V = Ed$ y ΔV permanece



constante, E también. La disminución de la intensidad del campo debida a la introducción del dieléctrico es compensada con el aumento de carga en las láminas del condensador. Ésta aumenta ϵ veces, por lo que la capacidad del condensador también.

Anteriormente se afirmó que la capacidad de un condensador depende solo de sus características. Sin embargo, al colocar un dieléctrico entre sus láminas estando conectado a la batería su carga aumenta, pero al hacerlo desconectado de ella no. ¿No es distinta entonces la capacidad en estos casos?

De este modo, la capacidad de un condensador de láminas con un dieléctrico entre ellas es ϵ veces mayor que sin el dieléctrico.

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d}$$

Uno de los tipos de condensadores de láminas más comunes consiste en dos tiras de papel de aluminio entre las cuales se coloca otra de papel parafinado. Las tiras pueden tener decenas de centímetros de longitud, pero se enrollan formando un cilindro, con lo cual el condensador queda compacto. En esos condensadores la distancia d entre las láminas es muy pequeña y el área A de ellas puede llegar a ser considerable.

En la electrónica y la microelectrónica los condensadores cumplen otras muchas importantes funciones además de la que hemos examinado, de acumular carga eléctrica. La variedad de tamaños y tipos de condensadores es muy amplia (Fig. 1.35), abarca desde los bancos de condensadores utilizados para almacenar grandes cantidades de carga eléctrica (Fig.1.33c) hasta los microscópicos condensadores incluidos en los circuitos integrados de microprocesadores y memorias de computadoras.

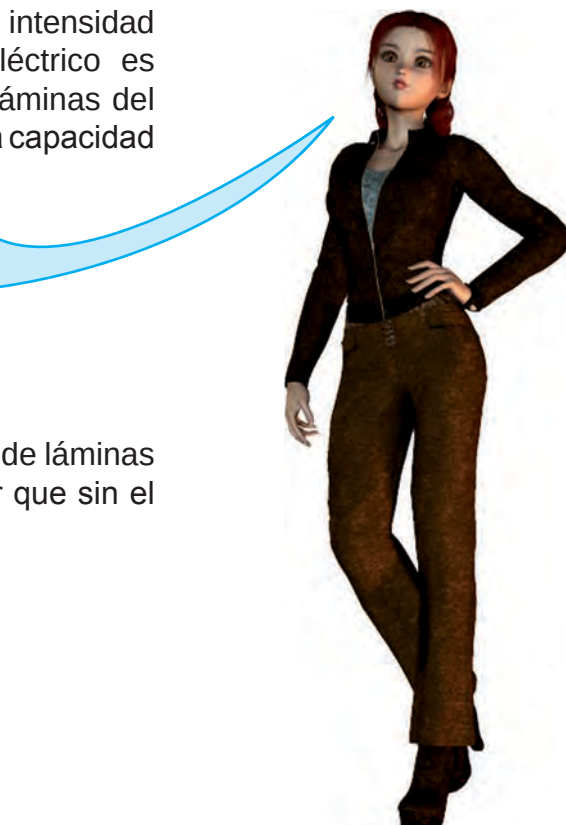


Fig. 1.35. La variedad de tamaños y tipos de condensadores es muy amplia.



Ejemplo 1.11. Cierta condensador está formado por dos tiras de papel de aluminio de 20 m longitud y 2.0 cm ancho, entre las cuales se colocó una tira de papel parafinado ($\epsilon = 2.2$) de espesor 0.1 mm. ¿Cuál es la capacidad eléctrica del condensador?

Para calcular la capacidad del condensador utilizamos la ecuación:

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d}$$

El área de las láminas del condensador es:

$$A = (20 \text{ m})(0.020 \text{ m}) = 0.40 \text{ m}^2$$

Por consiguiente:

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d} = \frac{(2.2)(0.40 \text{ m}^2)}{4\pi \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right)(0.1 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$C = 7.8 \times 10^{-8} \text{ F}$$

Ejemplo 1.12. a) ¿Qué área debería tener cada lámina de un condensador como el del ejemplo anterior, para que su capacidad fuese 1 F? b) ¿Qué longitud deberían tener las tiras de aluminio?

a) Una capacidad de 1 F es 1×10^7 veces mayor que la del condensador del ejemplo anterior. Como la capacidad es directamente proporcional al área de las láminas, el área de cada lámina del condensador debería ser 1×10^7 veces mayor, o sea:

$$(1 \times 10^7)(0.40 \text{ m}^2) = 4 \times 10^6 \text{ m}^2 = 4 \text{ km}^2$$

¡Dicha área equivale a la de un cuadrado de 2 km de lado!

b) Si el ancho de las tiras de aluminio es el del ejemplo anterior, entonces el área de ellas debe aumentar a cuenta de la longitud. Ésta debería ser 1×10^7 veces mayor:

$$(1 \times 10^7)(20 \text{ m}) = 2 \times 10^8 \text{ m}$$

¡Esta longitud es unas 15 veces mayor que el diámetro de la Tierra!

Comprenderás que un condensador de 1 F no puede ser como el descrito. Sin embargo, en la actualidad el desarrollo tecnológico es tal que se construyen condensadores de 1 F cuyo tamaño no es mayor que el de un vaso común.



1.2.9. Energía del campo eléctrico

Según la teoría del campo, **la energía de interacción entre cuerpos con carga eléctrica se almacena en el campo eléctrico originado por ellos**. Un condensador está formado por dos cuerpos cargados que interactúan entre sí, por lo que el campo eléctrico entre sus láminas almacena energía.

Para convencerse de que un condensador cargado posee energía, basta descargarlo a través de un circuito que contenga un bombillo de pequeño voltaje (Fig. 1.36). El bombillo se enciende por un instante, lo que indica que la energía eléctrica del condensador se ha transformado en otras formas, en particular en energía de radiación luminosa. La energía del condensador procede del trabajo realizado al transferir electrones de una lámina a otra durante el proceso de carga. Este trabajo es efectuado por la batería, la cual transforma energía química de los elementos que la forman en energía eléctrica del condensador.

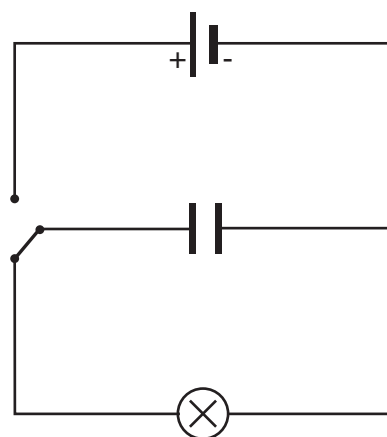


Fig. 1.36. Si se carga un condensador conectándolo a una batería y luego se desconecta de ella y se conecta a un bombillo de pequeño voltaje, éste se enciende por un instante, lo que evidencia que el condensador posee energía.

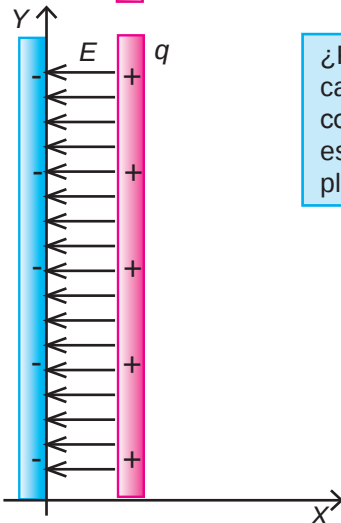
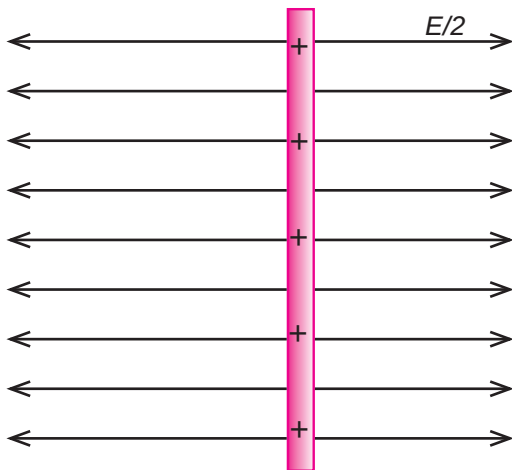
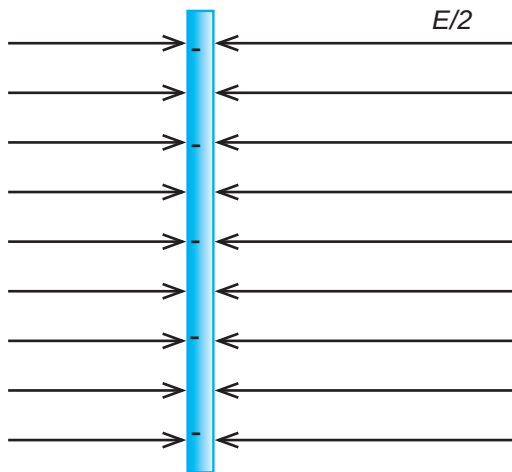


Fig. 1.37. Podemos pensar un condensador de láminas paralelas como una lámina con carga q colocada en el campo homogéneo de magnitud $E/2$ originado por la otra lámina.

En el funcionamiento de los desfibriladores portátiles, flash de cámaras y otros equipos, se utiliza esta propiedad de los condensadores de almacenar energía. El condensador se carga previamente, y luego, al hacer funcionar el equipo, entrega parte de la energía almacenada en forma de una corriente eléctrica de corta duración.

Obtengamos la expresión de la energía acumulada en el campo para un condensador de láminas paralelas.

Ya sabes que el campo entre tales láminas es homogéneo (Fig. 1.23c). Si su magnitud es E , entonces la magnitud del campo debido a cada lámina es $E/2$. Si ahora pensamos al condensador como una lámina con carga q colocada en el campo homogéneo de magnitud $E/2$ de la otra lámina (Fig. 1.36), podemos hallar fácilmente la expresión de la energía.

¿Por qué si la magnitud del campo entre las láminas del condensador de la figura 1.37 es E , entonces la debida a cada placa es $E/2$?



En el apartado 1.2.6 vimos que cuando se tiene una partícula con carga q en el campo eléctrico homogéneo entre dos láminas, la energía potencial es $E_p = qEx$, donde x es la posición de la partícula respecto a la lámina negativa. La lámina positiva del condensador representa un conjunto de partículas con cargas positivas, situadas en el campo de magnitud $E/2$ de la lámina negativa, a la distancia d de ella. Por tanto, según la ecuación anterior, la energía potencial del sistema de las dos láminas es:



$$E_p = qEx = q\left(\frac{E}{2}\right)d = \frac{1}{2}qEd = \frac{1}{2}q\Delta V$$

Recordando que $q = C\Delta V$, podemos escribir la **energía del condensador** como:

$$E_p = \frac{1}{2}C\Delta V^2$$

Cabe señalar que aunque hemos deducido esa expresión para un condensador de láminas paralelas, ella es válida para cualquier tipo de condensador.

Como hemos dicho, la energía del condensador se supone almacenada en el campo entre sus láminas. Por eso, si dividimos la expresión anterior entre el volumen delimitado por sus láminas, tendremos la **energía por unidad de volumen del campo**, o **densidad de energía** e_p . Para un condensador de láminas paralelas el cálculo es simple, ya que el volumen entre las láminas es Ad :

$$e_p = \frac{E_p}{Ad} = \frac{\frac{1}{2}C\Delta V^2}{Ad}$$

Teniendo en cuenta que $C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d}$ y que $\Delta V = Ed$, queda:

$$e_p = \frac{\frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{4\pi k d} (Ed)^2}{Ad} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon E^2}{4\pi k}$$

$$e_p = \frac{\epsilon}{8\pi k} E^2$$

Si bien el resultado ha sido obtenido para un condensador de láminas, en el cual el campo eléctrico es homogéneo, él es válido en general, para cualquier campo electrostático, e incluso también para campos eléctricos que varían con el tiempo. Si en cierto instante en un punto del espacio la intensidad de campo eléctrico es E , podemos decir que en ese instante y en ese punto hay una energía potencial por unidad de volumen dada por la ecuación anterior.



Ejemplo 1.13. Un desfibrilador posee un condensador de $80 \mu\text{F}$ con un voltaje de $4.0 \times 10^3 \text{ V}$. a) ¿Qué carga tiene el condensador? b) ¿Cuánta energía eléctrica almacena? c) Si durante una descarga sobre el pecho de un paciente el desfibrilador transmite $2 \times 10^2 \text{ J}$ en 2 ms , ¿cuál es la potencia de la descarga?



a) De la ecuación $C = \frac{q}{\Delta V}$ se obtiene:

$$q = C\Delta V = (80 \times 10^{-6} \text{ F})(4.0 \times 10^3 \text{ V}) = 0.32 \text{ C}$$

Nota que esta carga es considerable. Como dijimos en otro lugar, la carga que adquieren los cuerpos en las experiencias ordinarias de electrización suele ser inferior a $1 \times 10^{-6} \text{ C}$. La carga del condensador del desfibrilador es varios millones de veces mayor.

$$\text{b) } E_p = \frac{1}{2}C\Delta V^2 = \frac{1}{2}(80 \times 10^{-6} \text{ F})(4.0 \times 10^3 \text{ V})^2 = 6.4 \times 10^2 \text{ J}$$

Esta energía aproximadamente equivale, por ejemplo, a la necesaria para elevar un cuerpo de 1 kg a 64 m de altura. Durante cada descarga del desfibrilador, se trasmite solo parte de esa energía.

c) Potencia es la rapidez con que se transforma o transmite energía. En este caso:

$$P = \frac{\Delta E_p}{\Delta t}$$

donde ΔE_p es la energía transmitida durante la descarga y Δt su duración. Por tanto:

$$P = \frac{2 \times 10^2 \text{ J}}{2 \times 10^{-3} \text{ s}} = 1 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \times 10^5 \text{ W}$$

Esta potencia es realmente grande, unas $5\,000$ veces mayor que la de una lámpara de 20 W . Pero la descarga dura un tiempo muy breve.



1.3. Actividades de sistematización y consolidación

1.3.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

Átomo	Electromagnetismo
Campo	Electrón
Capacidad	Electroscopio
Carga	Faraday
Circuito	Faradio
Condensador	Homogéneo
Conductor	Molécula
Coulomb	Potencial
Dieléctrico	Protón
Electricidad	Voltio





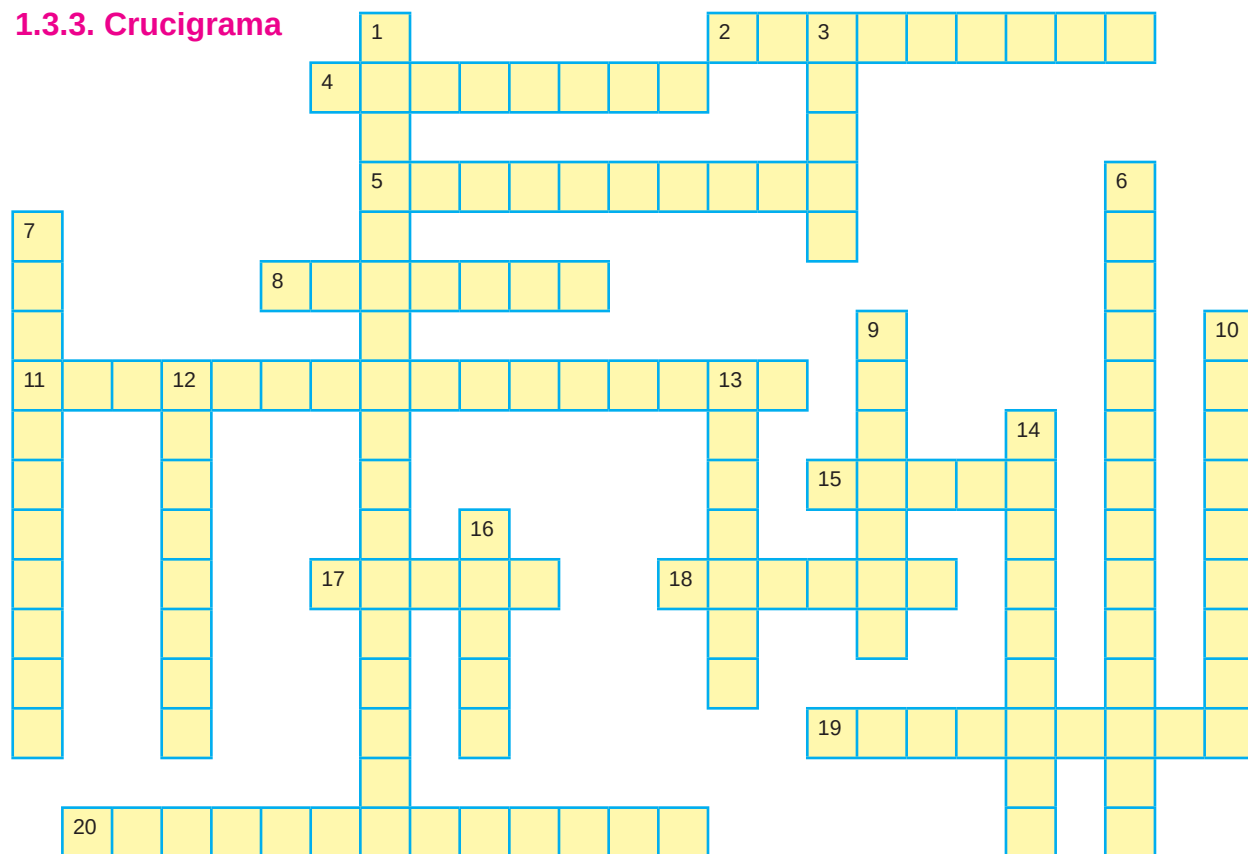
1.3.2. Conexión de conceptos e ideas

Relaciona las dos columnas escribiendo el número según corresponda.

- | | |
|--|--|
| 1. Mantiene la integridad de los átomos, de las moléculas y de todos los cuerpos con los que nos relacionamos. | () Balanza de torsión |
| 2. Científico cuyo nombre reciben las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo. | () Campo eléctrico |
| 3. Conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada. | () Capacidad eléctrica |
| 4. Científico a quien se debe la idea de líneas de campo. | () Carga eléctrica elemental |
| 5. Científico que se considera el descubridor del electrón. | () Charles A. Coulomb |
| 6. Científico a quien se debe la ley de la fuerza entre dos partículas cargadas en reposo. | () Circuito eléctrico |
| 7. Partículas responsables de que haya dos tipos de electricidad. | () Condensador |
| 8. Nombre que recibe la cantidad mínima de carga eléctrica. | () Constante dieléctrica |
| 9. Instrumento utilizado por Coulomb para establecer la ley que lleva su nombre. | () Densidad de energía |
| 10. Ente que rodea a todo cuerpo cargado eléctricamente y que actúa sobre otros cuerpos con carga. | () Dieléctricos |
| 11. Nombre de la magnitud utilizada para caracterizar el campo eléctrico. | () Dieléctricos no polares |
| 12. Líneas en el espacio que rodea a un cuerpo cargado, empleadas para caracterizar su campo eléctrico. | () Dieléctricos polares |
| 13. Energía de un sistema de cuerpos electrizados debida a la interacción eléctrica entre ellos. | () Diferencia de potencial |
| 14. Variación de la energía potencial por unidad de carga que tiene lugar cuando una partícula cargada se desplaza entre dos puntos de un campo eléctrico. | () Electrones y protones |
| 15. Nombre que comúnmente reciben en Física los aisladores. | () Energía potencial eléctrica |
| 16. Materiales en que los centros de carga positiva y negativa de sus moléculas no coinciden. | () Intensidad de campo eléctrico |
| 17. Materiales en que los centros de carga positiva y negativa de sus átomos o moléculas coinciden. | () Interacción electromagnética |
| 18. Cociente entre la magnitud del campo en el que se coloca un material y la magnitud del campo que resulta en su interior. | () James C. Maxwell |
| 19. Dispositivo que puede ser empleado para acumular carga eléctrica y energía. | () Joseph J. Thomson |
| 20. Magnitud que indica la carga eléctrica por voltio que puede almacenar un condensador. | () Líneas de campo eléctrico |
| 21. Energía por unidad de volumen del campo eléctrico. | () Michael Faraday |



1.3.3. Crucigrama



Horizontales

2. Magnitud que es igual al cociente entre la carga y el voltaje de un condensador.
4. Nombre que tenía en la antigua Grecia cierta resina fósil que se electrizaba al ser frotada.
5. Se dice de la carga eléctrica debido a que siempre se transfiere en porciones que son múltiplos enteros de la carga elemental.
8. Apellido de uno de los científicos que más contribuyó al desarrollo del electromagnetismo.
11. Una de las cuatro interacciones fundamentales considerada por la Física.
15. Ente que rodea a todo cuerpo cargado eléctricamente y que actúa sobre otros cuerpos con carga.
17. Tipo de material en el cual los electrones más externos de los átomos pierden el enlace con átomos dados y se mueven libremente dentro de la red de iones.
18. Unidad de diferencia de potencial.
19. Energía potencial por unidad de carga en un punto dado del campo eléctrico.
20. Nombre del instrumento que sirve para detectar si un cuerpo está cargado.

Verticales

1. Parte de la Física que examina los fenómenos eléctricos y magnéticos y la vinculación entre ellos.
3. Tipo de dieléctrico en que los centros de carga positiva y negativa de sus moléculas no coinciden.
6. Parte del electromagnetismo que estudia la interacción electromagnética entre cuerpos o partículas cargados sin considerar el movimiento de éstos.
7. Nombre de un dispositivo básico empleado en los circuitos eléctricos.
9. Unidad de Capacidad eléctrica.
10. Se dice de la mínima cantidad de carga eléctrica que existe.
12. Sistema de dispositivos eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada.
13. Unidad de carga eléctrica.
14. Se dice del campo eléctrico cuya magnitud, dirección y sentido son los mismos en todos los puntos del espacio.
16. Magnitud que caracteriza el grado de electrización de los cuerpos.

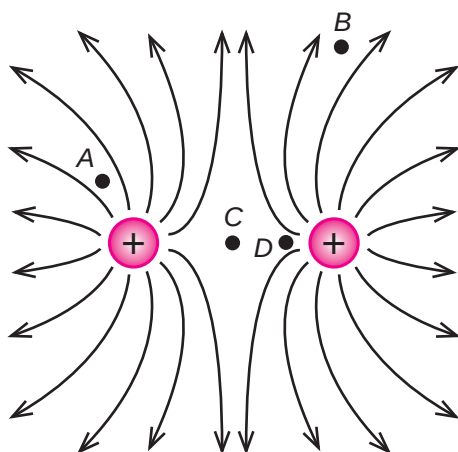


1.3.4. Actividades de repaso

1. Comenzando con el término “Electromagnetismo”, confecciona un diagrama que conecte y ramifique conceptos e ideas como los siguientes: interacción electromagnética, Electrostática, carga eléctrica, ley de Coulomb, campo eléctrico, potencial y diferencia de potencial, condensador, energía del campo eléctrico.
2. Intenta responder, resumidamente, las siguientes preguntas: ¿qué es la electricidad?, ¿cuáles son algunas de sus aplicaciones de interés?, ¿en qué consisten la ley de conservación de la carga eléctrica y la ley de Coulomb?, ¿cómo acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?
3. Expón e ilustra mediante ejemplos los conceptos de: a) carga eléctrica b) carga eléctrica elemental, c) campo eléctrico, d) intensidad de campo eléctrico e) líneas de campo, f) campo eléctrico homogéneo, g) potencial y diferencia de potencial, h) dieléctricos polar y no polar, i) condensador, j) capacidad eléctrica.
4. Explica cómo se utilizan las ideas básicas de la Electrostática en el funcionamiento de: a) la fotocopidora, b) la impresora de “chorro de tinta”, c) un desfibrilador portátil.
5. Si los átomos están compuestos por partículas con carga, ¿qué significa entonces la frase “un átomo neutro”?
6. Como sabes, los núcleos atómicos están formados por protones y neutrones concentrados en un volumen extremadamente pequeño. ¿Cómo se explica que mantengan su integridad, pese a las enormes fuerzas de repulsión entre los protones?
7. Explica por qué un cuerpo electrizado pierde con el tiempo dicha propiedad.
8. Explica, desde el punto de vista microscópico, la electrización de una regla plástica al frotarla con un paño o un pedazo de papel.
9. ¿Se electrizarán dos pedazos de papel recortados de una misma hoja al frotarlos entre sí? ¿Y dos láminas de un mismo plástico? Explica.
10. Atendiendo a la estructura interna de los cuerpos, ¿cómo se explica la atracción que ejerce uno electrizado sobre a) un cuerpo metálico, b) un cuerpo plástico o un pedacito de papel?
11. Describe los diversos procedimientos que conozcas de electrización de los cuerpos.



12. Una regla plástica se electrizó quedando cargada negativamente. ¿Permanece invariable la masa de la regla?
13. Se tienen dos cuerpos metálicos sobre soportes aislantes, una regla plástica y un paño. ¿Cómo electrizar los cuerpos con cargas de igual magnitud y signos opuestos, sin tocarlos?
14. Una regla plástica cargada negativamente atrae a un cuerpo suspendido mediante un hilo aislante. ¿Puede afirmarse que el cuerpo que cuelga del hilo está cargado positivamente? Y si una varilla de vidrio cargada positivamente hubiese repelido al cuerpo, ¿podría afirmarse que está cargado positivamente?
15. Imagina que alguien afirma que los cuerpos son atraídos hacia la Tierra por una fuerza eléctrica y no gravitatoria. ¿Cómo pudieras probar que no es cierto?
16. ¿Puede una partícula tener una carga eléctrica 2.3 veces mayor que la carga del electrón? Argumenta.
17. Observa la siguiente figura y ordena de menor a mayor la intensidad del campo en los puntos A, B, C y D.



18. Como sabes, un cuerpo electrizado atrae pequeños pedacitos de papel. ¿Qué sucederá con un pedacito de papel colocado en el campo eléctrico homogéneo entre dos láminas con cargas de signo contrario? Explica.
19. Imagina que de la placa negativa del sistema de la figura 1.25 se desprende un electrón, el cual se mueve hacia la placa positiva. ¿Aumenta o disminuye la energía potencial del sistema? ¿El electrón se mueve hacia un punto de mayor o menor potencial?



20. En un soporte aislante se fija una esfera metálica hueca, a cuya superficie exterior se conecta un electrómetro que permite determinar la magnitud y el signo de la carga que tenga la esfera. Por un orificio de ésta se introduce un cuerpo metálico cargado negativamente, colgado de un hilo aislante. a) ¿Qué tipo de carga indicará el electrómetro si el cuerpo introducido no toca la esfera? b) ¿Qué indicará luego de tocar el interior de la esfera? c) ¿Y si se extrae el cuerpo y luego de desconectar el electrómetro de la esfera se conecta a él?
21. Durante una tormenta acompañada de relámpagos es más seguro estar dentro de un carro que fuera. ¿Por qué?



22. Traza el gráfico aproximado del módulo de la intensidad de campo eléctrico de una esfera conductora cargada en función de la distancia al centro de la esfera.
23. ¿Tendrían igual magnitud las cargas de las láminas del condensador de la figura 1.32 si sus láminas no fuesen del mismo tamaño?
24. Una placa de cobre se coloca entre las láminas del condensador de la figura 1.32, sin hacer contacto con las láminas. ¿Cómo afecta esto a la capacidad?
25. El condensador de la figura 1.32 se carga con ayuda de la batería y luego se desconecta de ella. Entre sus láminas se introduce un bloque de dieléctrico. Analiza qué sucede con: a) su carga eléctrica, b) la intensidad del campo eléctrico en su interior, c) la diferencia de potencial entre sus láminas, d) su capacidad eléctrica, e) la energía que almacena. ¿Cuál sería la respuesta a los incisos anteriores si el condensador se mantiene conectado a la batería mientras se introduce el dieléctrico entre sus láminas?



1.3.5. Ejercicios de repaso

1. Los centros de dos pequeñas esferas metálicas con carga de $7.4 \times 10^{-8} \text{ C}$ están a 10 cm uno de otro. a) ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre ellas? b) Una de las esferas se toca con otra idéntica neutra, ¿cuál es ahora la fuerza eléctrica si se mantienen a la misma distancia? La constante en la expresión de la ley de Coulomb es $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Respuesta: a) 0.0049 N, b) 0.0025 N

2. En el átomo de hidrógeno, calcula cuántas veces mayor que la fuerza gravitatoria es la fuerza eléctrica entre el electrón y el núcleo. La carga elemental es $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, la masa del electrón $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ y la del protón $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, la constante de gravitación, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ y la constante en la expresión de la ley de Colulomb, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Respuesta: 2.3×10^{39} veces

3. La fuerza de atracción que mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra es $2.0 \times 10^{26} \text{ N}$. a) ¿Qué carga de igual magnitud y signos opuestos deberían tener la Tierra y la Luna para igualar dicha fuerza? b) ¿Qué cantidad de electrones en exceso o defecto corresponde a dicha carga? Considera la Tierra y la Luna como partículas y la distancia entre ellas $3.8 \times 10^5 \text{ m}$, la carga del electrón es $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. La constante en la expresión de la ley de Colulomb, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Respuesta: a) $5.2 \times 10^{13} \text{ C}$, b) 3.3×10^{32} electrones





4. Se sabe que cada átomo de cobre aporta dos electrones libres. a) Considera una esfera de cobre de 1 cm^3 de volumen y utiliza los datos y resultados del Ejemplo 1.3 para determinar el número de electrones libres de la esfera. b) Imagina que todos sus electrones libres se transfieren a otra esfera y que las dos esferas se colocan a 1.0 m una de otra, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas?

Respuesta: a) 8.4×10^{22} electrones, b) $6.6 \times 10^{-18} \text{ N}$

5. a) Si de la esfera de cobre del problema anterior solo se separara y concentrara en otra esfera el 1% de sus electrones libres, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas al colocarlas a 1.0 m una de otra? b) Este problema ilustra que por qué solo es posible separar una parte insignificante de los electrones y protones que posee un cuerpo. Explica.

Respuesta: $6.6 \times 10^{-16} \text{ N}$

6. Entre dos láminas horizontales hay un campo homogéneo de intensidad $1.3 \times 10^5 \text{ V/m}$, dirigido verticalmente hacia abajo. Una microscópica gota líquida de masa $2.0 \times 10^{-9} \text{ g}$ está en equilibrio en dicho campo. Encuentra: a) la carga de la gota, b) el número de electrones que tiene en exceso o defecto.

Respuesta: a) $1.5 \times 10^{-16} \text{ C}$, b) 937 electrones en exceso

7. Para la situación del ejemplo 1.5, determina la magnitud de la intensidad de campo resultante en: a) el punto medio entre las esferas, b) un punto P situado 5.0 cm encima del punto medio.

Respuesta: a) 0, b) $3.8 \times 10^5 \text{ V/m}$ en la línea que une el punto medio y el P

8. Imagina que las esferas que cuelgan de los hilos en la situación del ejemplo 1.5 se fijan en las posiciones representadas en la figura. Utiliza los resultados del problema anterior para hallar la fuerza ejercida sobre una tercera esfera con igual carga que se colocara en, a) el punto medio entre las esferas, b) un punto situado 5.0 cm encima del punto medio. c) ¿Por qué en este problema se habrá dicho que se fijan las esferas que cuelgan de los hilos?

Respuesta: a) 0, b) $3 \times 10^{-2} \text{ N}$ dirigida verticalmente hacia arriba

9. La Tierra está rodeada de un campo eléctrico dirigido hacia su interior, cuya intensidad es, como promedio, 150 V/m . a) Considera que en cierta región el campo tiene ese valor y determina la diferencia de potencial entre los pies y la cabeza de una persona de 1.70 m. b) ¿Cuándo será mayor la energía potencial debida a ese campo, al situar un globo con carga positiva en la cabeza o en el suelo? c) ¿Y si el globo estuviese cargado negativamente? Argumenta.

Respuesta: a) 255 V, b) en la cabeza, c) en el suelo



10. En la situación del ejemplo 1.8: a) ¿qué variación de energía potencial tiene lugar cuando la gota recorre las placas?, b) ¿cuál es la diferencia de potencial entre los puntos de entrada y salida de la gota?

Respuesta: a) $-1.6 \times 10^{-10} \text{ J}$, b) $1.3 \times 10^3 \text{ V}$

11. Un condensador de capacidad $20 \mu\text{F}$ se carga conectándolo a una batería de 12 V . ¿Qué cantidad de carga pasó a través de la batería?

Respuesta: $2.4 \times 10^{-4} \text{ C}$

12. Se puede construir un condensador “casero” colocando una hoja de papel entre dos de papel de aluminio. Imagina que la hoja de papel tiene $21 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ y un espesor de 0.10 mm . a) ¿Cuál sería la capacidad del condensador? b) ¿Qué carga almacena si se conecta a una batería de 12 V c) ¿Qué voltaje máximo podría soportar?

Respuesta: a) $1.9 \times 10^{-8} \text{ F}$ ó $0.019 \mu\text{F}$, b) $2.3 \times 10^{-7} \text{ C}$, c) $1.6 \times 10^3 \text{ V}$ ó 1.6 kV

13. Entre los tipos de micrófono profesionales más utilizados en la actualidad están los de condensador. Su elemento básico consiste en dos láminas conductoras cuya separación varía ligeramente al incidir sobre una de ellas la onda sonora. Un circuito electrónico convierte las variaciones de capacidad en señales eléctricas que son enviadas al reproductor de sonido. Imagina un micrófono de este tipo con área de sus láminas conductoras de 3.0 cm^2 cada una, separadas una distancia de 1.0 mm . a) ¿Cuál es su capacidad? b) Si las láminas se acercan 0.10 mm , ¿cuál es la nueva capacidad?

Respuesta: a) $2.7 \times 10^{-12} \text{ F}$ ó 2.7 pF , b) 2.9 pF

14. Determina la energía eléctrica almacenada en un volumen de 10 m^3 cerca de la superficie de la Tierra, debida al campo eléctrico que la rodea. Considera que la intensidad del campo es 150 V/m .

Respuesta: $1.0 \times 10^{-7} \text{ J/m}^3$

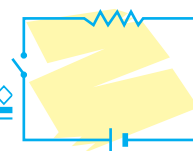
15. Un enorme condensador natural es el formado por una nube cargada y la superficie de la Tierra. Un modelo muy simplificado para poder efectuar algunas estimaciones, consiste en suponer que la parte baja de la nube y la superficie de la Tierra representan un condensador plano en que el campo es homogéneo. Valores posibles son: el área de la parte baja de la nube, $1 \times 10^2 \text{ km}^2$; su distancia a la superficie de la Tierra 1.5 km y la diferencia de potencial entre ellas $3 \times 10^7 \text{ V}$. Determina para este “condensador”: a) su capacidad eléctrica, b) la carga que acumula, c) la intensidad de campo, d) la energía potencial y la densidad de energía eléctrica.

Respuesta: a) $0.6 \mu\text{F}$, b) $2 \times 10 \text{ C}$, c) $2 \times 10^4 \text{ V/m}$, d) $3 \times 10^8 \text{ J}$, $2 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$

2

CORRIENTE ELECTRICA Y CIRCUITOS





Durante el estudio del capítulo anterior te relacionaste con numerosos ejemplos de cuerpos que transfieren carga eléctrica a otro cuerpo: al tocar un cuerpo metálico con una regla plástica cargada, o sencillamente acercarla hasta saltar una chispa; el rayo, que es una variante de lo anterior a gran escala; la descarga de un condensador a través de un bombillo, o a través del cuerpo humano, como en un desfibrilador. En todos estos casos la transferencia de partículas cargadas de un cuerpo a otro tiene lugar en tiempos muy breves. En este capítulo comenzaremos analizando las condiciones que se requieren para que tal movimiento de partículas cargadas pueda mantenerse, es decir, para que exista una **corriente eléctrica**. Luego profundizaremos en los efectos que ésta produce, introduciremos las magnitudes básicas con que se relaciona y examinaremos cuáles son sus peculiaridades en metales, líquidos, gases y semiconductores. Por último, estudiaremos el funcionamiento de algunos circuitos y dispositivos eléctricos simples, pero de gran interés. En resumen, las cuestiones básicas que abordaremos serán:

¿En qué consiste la corriente eléctrica? ¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista? ¿Qué efectos puede producir? ¿Cuáles son las magnitudes básicas que la caracterizan y cómo operar con ellas? ¿Qué peculiaridades tiene en los metales, líquidos, gases y semiconductores? ¿Cómo funcionan algunos circuitos y dispositivos eléctricos?

2.1. Corriente eléctrica

2.1.1. Naturaleza de la corriente eléctrica y condiciones para que exista

En la vida cotidiana frecuentemente escuchamos y empleamos el término “corriente eléctrica”. La palabra **corriente** generalmente se relaciona con flujo o movimiento de algo en cierta dirección: corriente de agua, de aire, corriente sanguínea. Consecuentemente, corriente eléctrica significa flujo o movimiento **de electricidad** en determinada dirección. En los sólidos, como sabes, dicha electricidad se transmite generalmente por medio de electrones. Pero en los gases



pueden desplazarse no solo electrones, sino además iones positivos y negativos (como en las descargas eléctricas atmosféricas y en las lámparas fluorescentes). Por su parte, en los líquidos conductores de la electricidad, lo que fluye son iones (por ejemplo, durante una electrólisis).

De acuerdo con lo dicho en el texto, la transferencia de partículas de un cuerpo a otro durante la electrización por frotamiento y las descargas eléctricas atmosféricas son corrientes eléctricas.

Se denomina *corriente eléctrica* al movimiento de partículas con carga eléctrica (electrones, iones u otras partículas) en determinada dirección.

En efecto, solo que ellas tienen lugar durante tiempos muy breves. Precisamente trataremos acerca de las condiciones que se necesitan para que se mantenga dicha corriente.

¿Y también es una corriente eléctrica el haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional?

Sí, también, pues es un movimiento de partículas cargadas en determinada dirección.



Una corriente eléctrica es un movimiento de partículas cargadas, pero no todo movimiento de éstas representa una corriente eléctrica. Explica por qué.

Es necesario subrayar que tanto los electrones libres en los sólidos, como los iones en gases y líquidos, se mueven desordenadamente a grandes velocidades (Fig. 2.1) y que esto tiene lugar, haya o no corriente eléctrica. Lo que llamamos corriente eléctrica es el movimiento que, pese a ese continuo desplazamiento desordenado, realizan de conjunto las partículas con carga en **determinada dirección**.



¿Y el haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional?

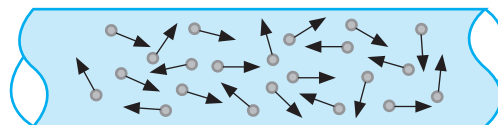
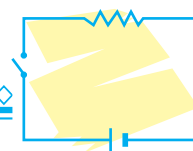


Fig. 2.1. Tanto los electrones libres en los sólidos como los iones en gases y líquidos se mueven desordenadamente a grandes velocidades.



Ahora que ya tienes una idea de qué es la corriente eléctrica, intentaremos contestar la segunda pregunta planteada al comienzo de la unidad: *¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista?*

De acuerdo con lo dicho anteriormente, **para que exista una corriente eléctrica se requiere, en primer lugar, la presencia de partículas cargadas libres**. Esto es lo que hace a los cuerpos **conductores**. Si los electrones y protones están enlazados entre sí en los átomos o moléculas, como en los dieléctricos, entonces no puede tener lugar una corriente eléctrica.

En segundo lugar, se necesita una fuerza que actúe en determinada dirección sobre esas partículas con carga. Dicha fuerza, como sabes, puede ser originada por un **campo eléctrico**. Y si se tiene un campo eléctrico a lo largo del conductor, entonces también podemos decir que hay una **diferencia de potencial** entre sus extremos.

De modo que **la segunda condición para que exista una corriente eléctrica es que haya un campo eléctrico en el conductor, o lo que es equivalente, cierta diferencia de potencial entre dos puntos suyos**.

Probablemente te preguntarás, ¿campo eléctrico en un conductor?, ¿y no vimos en la unidad anterior que en ellos la intensidad de campo es nula? Sin embargo, debes tener en cuenta que la intensidad de campo en el interior del conductor es nula, cuando las partículas con cargas de signos contrarios, al moverse bajo la influencia del campo se acumulan en lados opuestos del conductor, originando una intensidad de campo que compensa a la del campo externo. Si las partículas tienen la posibilidad de moverse permanentemente en un circuito, entonces la intensidad del campo externo no es compensada. Cuando el campo externo se suprime, desaparece el movimiento orientado de las partículas cargadas y, por tanto, la corriente eléctrica. Esto se debe a la resistencia que presentan al movimiento, en el caso de los metales, la red de iones a través de la cual se desplazan los electrones y en el caso de los electrolitos y gases, las moléculas neutras.



Resume las condiciones esenciales que se requieren para generar y mantener una corriente eléctrica.



Resume las condiciones que se requieren para que exista corriente eléctrica.



Lo estudiado en la unidad anterior sugiere que un procedimiento elemental de crear un campo en el interior de un conductor, digamos en un alambre, y generar así una corriente eléctrica, podría consistir en conectar el alambre a dos cuerpos metálicos *A* y *B* (Fig. 2.2), uno de ellos, por ejemplo el *A*, con carga. **Bajo la acción del campo** originado por *A*, los electrones libres, no obstante su movimiento desordenado, se orientan en dirección al cuerpo *B*. Sin embargo, esta corriente eléctrica existe solo por un instante, para mantenerla se requiere **algún dispositivo que, continuamente, al tiempo que acumula electrones en una parte del conductor, extraiga de la otra**. Esta es la tercera condición que se necesita para mantener una corriente eléctrica.

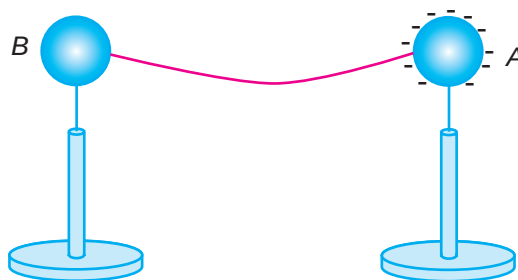


Fig. 2.2. Bajo la acción del campo eléctrico originado en el alambre por el cuerpo cargado, los electrones libres orientan su movimiento en dirección al cuerpo *B*.

Durante los siglos XVIII y XIX se idearon varios mecanismos basados en la electrización **por frotamiento** -denominados **máquinas electrostáticas**- que permitían mantener la situación esquematizada en la figura 2.2. En la figura 2.3 se muestran la máquina de Wimshurst, desarrollada a finales del siglo XIX y el generador de Van de Graaff, inventado alrededor de 1930. Pero la eficiencia de los generadores electrostáticos para producir corriente es extremadamente pequeña, logran transformar solo una pequeña parte de la energía mecánica invertida en el frotamiento, en energía eléctrica.

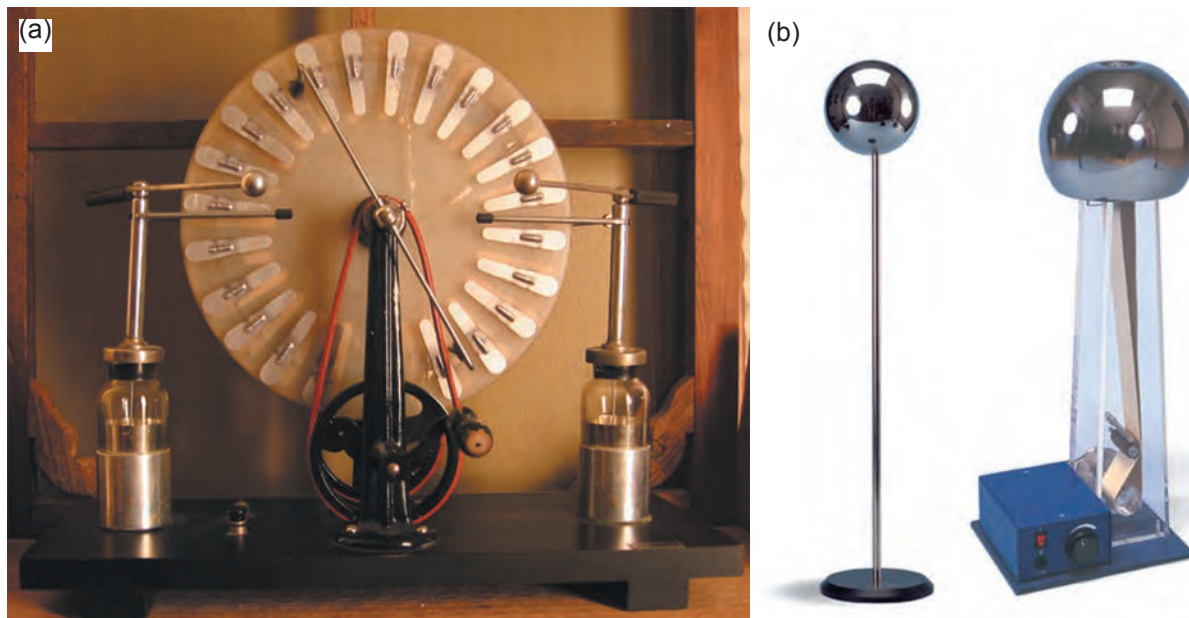


Fig. 2.3. (a) Máquina de Wimshurst, desarrollada a fines del siglo XIX. (b) Generador de Van de Graaff, inventado hacia 1930.

Como hemos dicho, el primer generador o fuente de electricidad efectivo fue la pila eléctrica, inventada por Alessandro Volta en el año 1800. Su fundamento es también **la electrización de un cuerpo al ponerlo en contacto con otro de diferente material**. Por ejemplo, cuando en agua acidulada con sulfúrico se introduce una lámina de zinc, esta se electriza negativamente. Si en la misma disolución se coloca una de cobre, apenas se electriza. Por eso, si a continuación el zinc y el cobre se unen mediante un conductor, se produce una corriente eléctrica (Fig. 2.4a). En las pilas electroquímicas, como la de Volta (Fig. 2.4b), tiene lugar una continua transformación de energía interna en energía de la corriente eléctrica. Si se desconecta el conductor que une los terminales, la reacción cesa. La pila de Volta fue precursora de las modernas pilas electroquímicas.

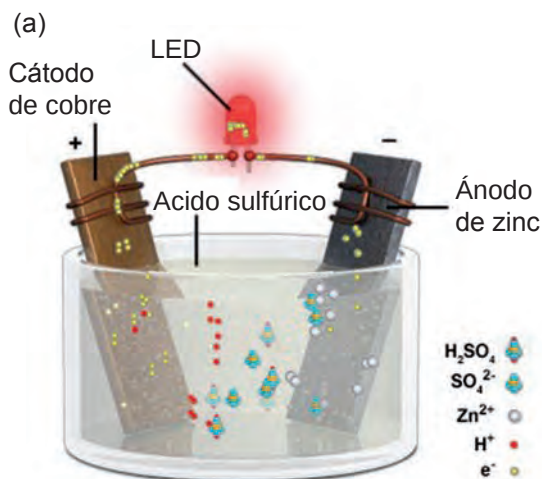


Fig. 2.4a. Cuando una lámina de zinc se introduce en una solución acidulada con sulfúrico se carga negativamente. Por eso, si mediante un conductor se unen las láminas circula corriente eléctrica y al intercalar un LED este se enciende.

¡Entonces el fundamento de la pila de Volta es, en esencia, el mismo que el de la electrización al poner un cuerpo en contacto con otro de un material diferente!

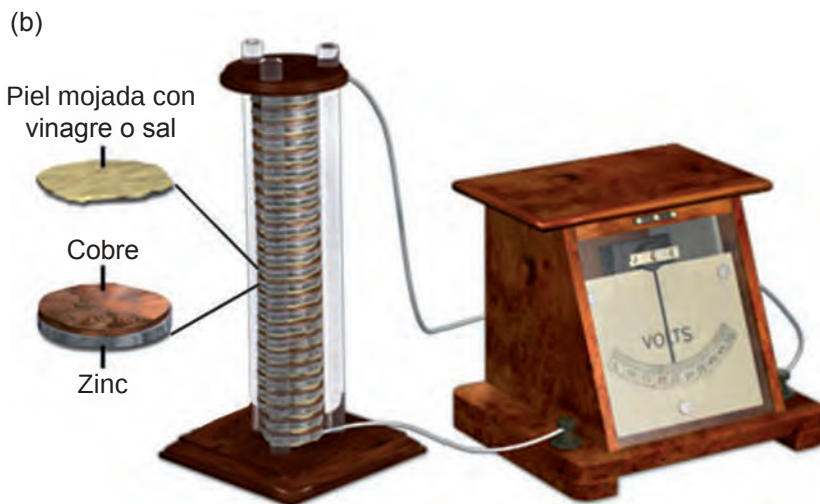


Fig. 2.4b. Pila electroquímica semejante a la inventada por Volta.



Indaga cuál es la razón por la cual los generadores electroquímicos de electricidad suelen denominarse “pilas”.

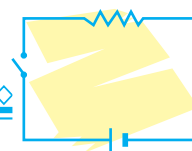
Indaga acerca de diversas aplicaciones de las celdas solares.



Sí, recuerda que la función del frotamiento es, básicamente, mejorar el contacto entre los cuerpos. Y el contacto de un líquido y un sólido puede ser excelente.

Además de las pilas electroquímicas, en la actualidad se ha extendido el uso de las **pilas o celdas solares**. Una explicación muy simplificada de su funcionamiento consiste en lo siguiente: Si se unen dos materiales **semiconductores** apropiados, en la zona de contacto uno se electriza negativamente y el otro positivamente. En consecuencia, al unir mediante un conductor sus extremos libres, fluiría una corriente eléctrica. La corriente se mantiene transmitiendo energía a la unión, al hacer incidir radiación sobre ella.

De este modo, en las pilas, la energía necesaria para mantener la corriente eléctrica se obtiene mediante reacciones químicas, elevación de temperatura, radiación, según sean electroquímicas, térmicas o solares. La región de la pila donde se acumula carga positiva se denomina terminal (o polo) positivo y la región donde se acumula carga negativa, terminal (o polo) negativo.



2.1.2. Efectos de la corriente eléctrica

Desde el curso de Mecánica conoces que en la naturaleza no ocurre ningún cambio sin que tenga lugar algún otro cambio, y que esto constituye el aspecto cualitativo de una ley universal, la ley de conservación de la energía. En las pilas electroquímicas, térmicas o solares, la reacción química, la elevación de temperatura o la radiación, originan corriente eléctrica. A su vez, esta puede dar lugar a otros cambios, comúnmente denominados **efectos de la corriente eléctrica**. Entre los efectos más comunes se encuentran los **térmicos**, **luminosos**, **químicos** y **magnéticos** (Fig. 2.5) La corriente eléctrica puede originar también ondas electromagnéticas, por ejemplo, de radio y televisión. Es en estos cambios o efectos producidos por la corriente eléctrica que se apoya el funcionamiento de los equipos eléctricos.

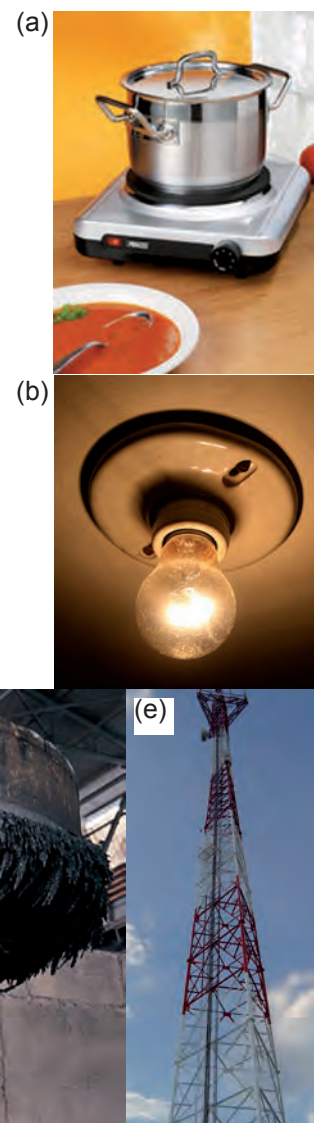


Fig. 2.5. Ejemplos de efectos de la corriente eléctrica: (a) térmico, (b) luminoso, (c) químico, (d) magnético, (e) generación de ondas electromagnéticas.

Los efectos luminoso y térmico de las descargas eléctricas atmosféricas han acompañado al hombre a lo largo de toda su existencia, sin que durante mucho tiempo este supiera que eran producidos por una breve pero gigantesca corriente eléctrica. Luego de inventarse la pila eléctrica en 1800 los científicos inmediatamente comenzaron a investigar los efectos luminoso, térmico y químico de la corriente. El efecto magnético fue descubierto un poco más tarde, en 1820, por el físico y químico Hans Christian Oersted (1777-1851), al parecer casualmente, mientras

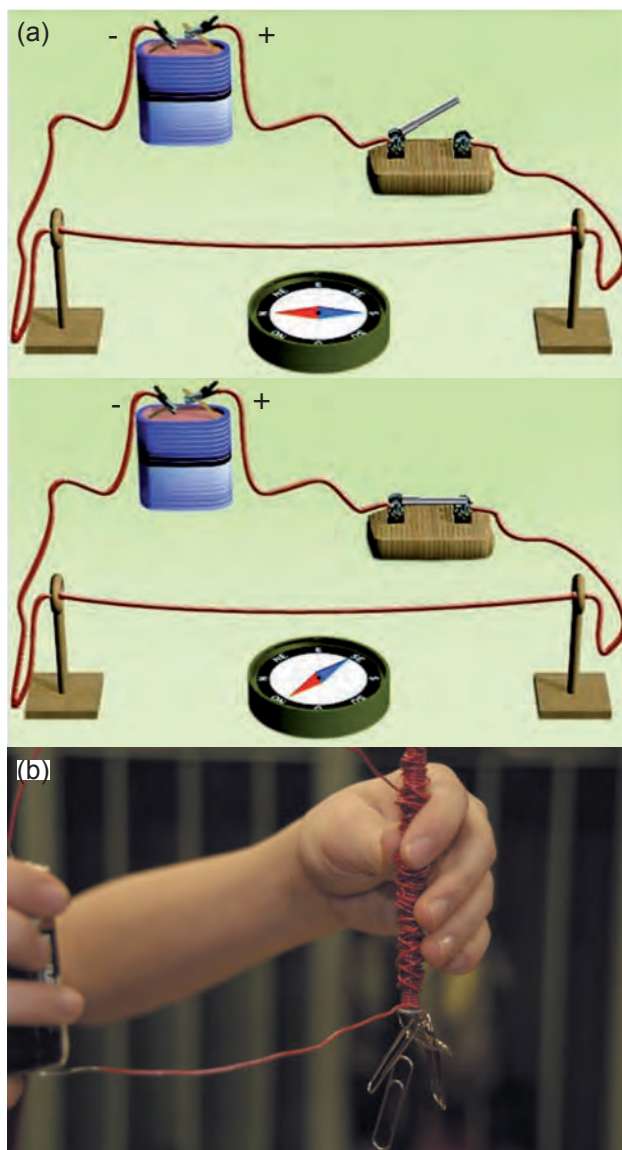
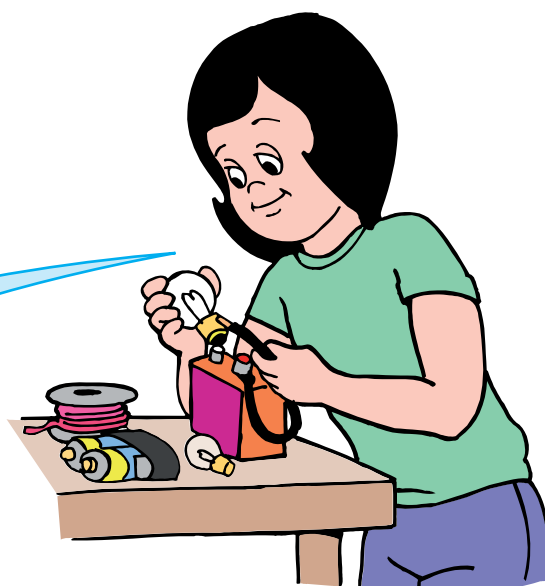


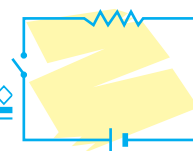
Fig. 2.6. Efecto magnético de un conductor con corriente: (a) la aguja de una brújula se desvía al colocar sobre ella un conductor con corriente (Experiencia de Oersted), (b) El efecto magnético se refuerza si el conductor se enrolla alrededor de un cuerpo ferroso (electroimán).

Menciona ejemplos de equipos electrodomésticos cuyo funcionamiento se apoye en cada uno de los efectos de la corriente eléctrica mencionados en el texto.

preparaba una conferencia. La experiencia, conocida como **experiencia de Oersted**, consiste en lo siguiente: si sobre una aguja magnética (brújula) orientada en el campo magnético de la Tierra se coloca, paralelamente a ella, un conductor con corriente eléctrica (Fig. 2.6a), entonces la aguja se desvía. El experimento pone de manifiesto que **la corriente provoca sobre la aguja un efecto similar al de un imán**. Si el conductor con corriente se enrolla alrededor de un cuerpo ferroso (electroimán), el efecto magnético se refuerza (Fig. 2.6b).

Entre los efectos de la corriente eléctrica pudiera decirse que el más fundamental es el magnético, porque a diferencia de los otros, se manifiesta en todos los casos, sin exclusión alguna, en que hay una corriente eléctrica. El efecto químico, por ejemplo, solo tiene lugar en electrolitos disueltos o fundidos, y el térmico no se manifiesta en los superconductores.





2.1.3. Sentido de la corriente, corrientes directa y alterna

¿Qué sucede con el movimiento de las partículas cargadas en un circuito eléctrico, si se intercambian los terminales o polos de la pila eléctrica a que está conectado?

Cuando se intercambian entre sí los polos de una pila eléctrica a la que está conectado, por ejemplo un bombillo de linterna, se invierte el sentido de la intensidad de campo eléctrico y, por tanto, también el de las fuerzas que actúan sobre los electrones y el del movimiento de conjunto de éstos. No obstante, los efectos térmico y luminoso producidos por la corriente continúan siendo exactamente los mismos.

Sin embargo, en el experimento de Oersted (Fig. 2.6a), al intercambiar los polos de la batería a que está conectado el conductor, el efecto producido varía: la aguja magnética se desvía hacia el lado opuesto. Similarmente, al invertir la conexión en los terminales de un electroimán (Fig. 2.6b), aunque continúa atrayendo pedazos de metal ferroso, su polo norte pasa a ser sur y a la inversa, lo que puede comprobarse con ayuda de una brújula. El efecto químico también depende del **sentido de la corriente**. Por ejemplo, en la electrólisis de una disolución de cloruro de sodio en agua, después de invertir los polos de la fuente, donde se liberaba cloro, se liberará hidrógeno y viceversa.

De este modo, el **sentido de la corriente** no influye en el funcionamiento de ciertos equipos y dispositivos, como por ejemplo en el caso de un bombillo o una hornilla eléctrica, pero es decisivo en muchas otras situaciones de la vida práctica: durante la electrólisis, al cargar una batería o pila, al poner en funcionamiento un reloj eléctrico, etc.

En los metales la corriente eléctrica se debe al movimiento de electrones, es decir, partículas de carga negativa, pero en los electrolitos y en los gases está formada por el movimiento de iones de ambos signos. El movimiento de los dos tipos de partícula, positiva y negativa, representa una corriente eléctrica, ¿cuál tomar entonces como sentido

Planifica y realiza algunos experimentos con el propósito de constatar que los efectos magnético y químico de la corriente eléctrica dependen de su sentido.





de la corriente, el movimiento de las partículas de carga negativa o el de las partículas de carga positiva? Resulta que con solo una excepción los efectos de una corriente formada por partículas de carga negativa moviéndose en cierto sentido, son exactamente los mismos que los de una corriente igual de partículas con carga positiva, moviéndose en sentido contrario.

Hace mucho, antes de conocer la naturaleza de la corriente eléctrica, los científicos acordaron que **el sentido de la corriente es del terminal (o polo) positivo de la fuente al negativo, lo que equivale a una corriente de carga positiva.**

Así, aunque en un circuito formado por una pila y un bombillo (Fig. 2.7), la corriente eléctrica se debe a los electrones y estos se mueven en el sentido del polo negativo al positivo de la pila, de acuerdo con la convención histórica el sentido de la corriente es el contrario: del terminal positivo al negativo.

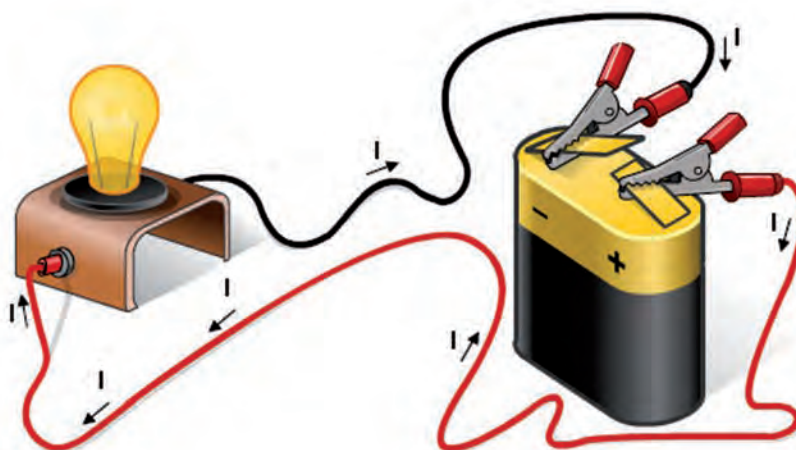
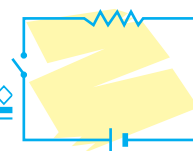


Fig. 2.7. De acuerdo con la convención adoptada, en este circuito la corriente fluye en el sentido del polo positivo de la fuente al negativo. Ello equivale a la corriente real negativa (electrones) que fluyen del polo negativo al positivo.

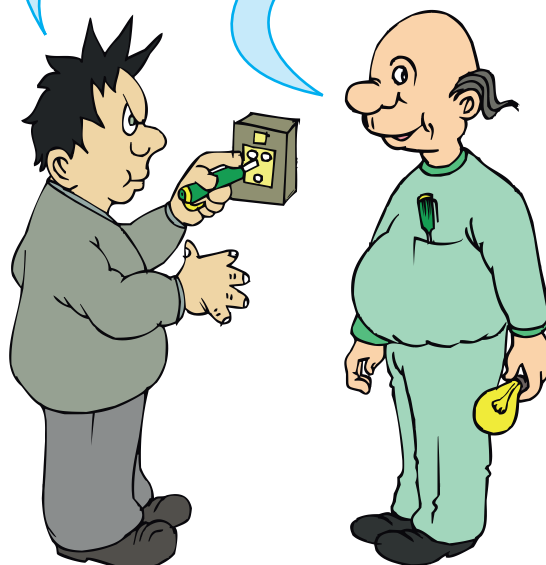


2.1.3.1. Corriente directa y corriente alterna

La corriente producida por las pilas, acumuladores y otros generadores como los mencionados hasta aquí, se denomina **corriente directa (CD)**. Estos generadores **mantienen en sus terminales el mismo tipo de electricidad, positiva o negativa**, por lo que al conectarlos a un circuito **la corriente fluye siempre en un mismo sentido**. A diferencia de ellos, en un enchufe habitual de la red eléctrica, uno de los terminales (el comúnmente llamado “vivo”) -o los dos si es de 220 voltios- varía constantemente de positivo a negativo y viceversa con cierta rapidez. El voltaje en los terminales del enchufe y, en consecuencia, la corriente eléctrica en los conductores cuando algún equipo se conecta a él, realizan **oscilaciones, alternando** entre un sentido de movimiento y el contrario. De ahí que esta corriente se denomine **corriente alterna (CA)**. En México, la frecuencia o rapidez con que se realizan tales oscilaciones es de 60 Hz.

Explica con tus palabras en qué se diferencian la corriente “directa” y la corriente “alterna”.

¿Qué significa la afirmación del texto de que la corriente originada por un enchufe de la red eléctrica “oscila”?



Puesto que el sentido de la corriente no influye en los efectos térmico y luminoso, cuando se trata de ellos no importa si la corriente es directa o alterna. Sin embargo, en otras muchas aplicaciones y, en especial, para la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias resulta decisivo el uso de la corriente alterna. En esto profundizaremos en el capítulo 4.

Tal vez te estés haciendo algunas preguntas como las siguientes: ¿a qué velocidad avanzan los electrones cuando encendemos una linterna? o ¿qué distancia recorren en un conductor conectado a un enchufe si en este caso la corriente varía su sentido 60 veces por segundo?

Como ejemplo, consideremos un pequeño bombillo conectado a una pila mediante un alambre de cobre de alrededor de 15 cm de largo y 1 mm de diámetro (Fig. 2.8). Las partículas que constituyen los cuerpos, ya sean átomos y moléculas neutros, o iones y electrones “libres”, se mueven



Fig. 2.8. Los electrones del alambre que conecta el bombillo a la pila se mueven desordenadamente con velocidades del orden de los 1 000 km/s, pero la velocidad del movimiento de conjunto de tales electrones es inferior a 0.07 mm/s.

En la experiencia de la figura 2.8, ¿qué distancia habrán avanzado, de conjunto, los electrones que constituyen la corriente eléctrica al cabo de una hora?



desordenadamente y con grandes velocidades. En particular, semejante alambre tiene unos 10^{23} electrones “libres” que participan en la corriente eléctrica, los cuales se mueven caóticamente con una velocidad que, a la temperatura ambiente, es, por término medio, del orden de 1 000 km/s. Sin embargo, aún cuando la corriente en el alambre fuese de 1 **ampere**, lo cual es ya un valor relativamente alto para este caso, **la velocidad del movimiento de conjunto** de los electrones sería de tan solo unos 0,07 mm/s. ¡Imagina lo pequeña que será la amplitud de las oscilaciones que de conjunto realizan los electrones si la corriente es alterna! Probablemente te estés preguntando, ¿cómo es posible entonces que una lámpara se encienda inmediatamente que accionamos el interruptor?

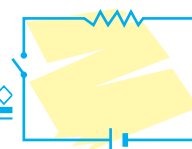
Recuerda que en los conductores metálicos como el alambre, la corriente eléctrica está formada por un movimiento de electrones en determinada dirección **al actuar sobre ellos un campo eléctrico**. Tal campo aparece inmediatamente que se cierra el interruptor y se propaga a través de él a una velocidad cercana a la de la luz, es decir, próxima a 300 000 km/s, por lo cual el efecto nos parece inmediato.

2.1.4. Magnitudes básicas en los circuitos eléctricos

Cualquiera que sea el circuito de que se trate -desde el más simple hasta el más complejo- puede ser caracterizado mediante unas pocas magnitudes básicas: intensidad de corriente, diferencia de potencial o voltaje, potencia y fuerza electromotriz. A continuación examinamos cada una de estas magnitudes.

2.1.4.1. Intensidad de corriente

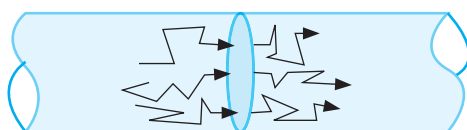
Ya sabes que la corriente eléctrica consiste en el movimiento de conjunto de partículas cargadas (electrones, iones u otras partículas cargadas) **en determinada dirección**. Pero naturalmente, la **carga neta** que en cierto tiempo pasa por la **sección transversal** de un conductor puede ser mayor o menor, dependiendo de la fuente de electricidad utilizada y de las características del circuito.



Se denomina **intensidad de corriente eléctrica (I)** a la rapidez con que fluye **carga neta** a través de la sección transversal de un conductor.

Si llamamos Δq a la **carga neta** que pasa por la sección transversal del conductor y Δt al intervalo de tiempo empleado en atravesarla, entonces la **intensidad de corriente** es:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

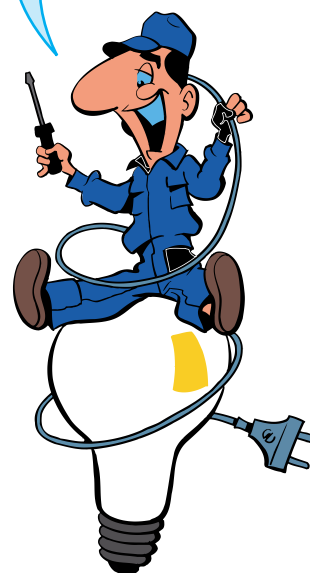


Por supuesto, si la rapidez con que fluye la carga no es constante, entonces la ecuación anterior expresa solo una **intensidad de corriente media**. En tales casos la intensidad de corriente instantánea es:

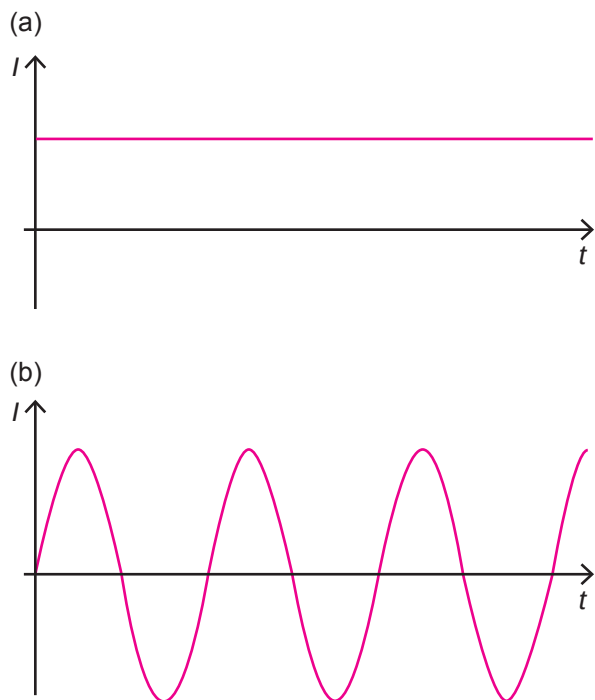
$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Cómo realizar esta operación matemática, lo aprenderás en la formación profesional.

¿Por qué en el texto se subraya que la intensidad de corriente se refiere a la carga "neta" que pasa a través de la sección transversal de un conductor?



Imagina que para conectar un bombillo a unas pilas de linterna, utilizas un alambre de 1 mm de diámetro y otro de 2 mm. ¿En cuál de ellos será mayor la velocidad del movimiento orientado de los electrones? ¿Y la intensidad de corriente?



Al conectar un bombillo a varias pilas, como por ejemplo en una linterna, la corriente es **directa**, pues no varía su sentido, y además **constante**, porque su intensidad permanece la misma. Cuando se utiliza una batería para hacer pasar corriente eléctrica a través de un electrolito y realizar la electrólisis, la corriente también es directa y constante. En cambio, al conectar un bombillo de filamento a un enchufe habitual de la casa, la corriente es **alterna**. En este caso, además, la intensidad de corriente depende del tiempo según las funciones seno o coseno. En la figura 2.9 se muestran los gráficos de $I(t)$ para una **corriente directa constante** y para una **corriente alterna sinusoidal**.

Fig. 2.9. Gráficos de $I(t)$ para: (a) una corriente directa constante, (b) una corriente alterna sinusoidal.



André Marie Ampère (1775-1836), físico y matemático francés, quien introdujo el término “corriente eléctrica” y desarrolló aspectos importantes de la teoría electromagnética.

En el capítulo anterior ya dijimos que en el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de intensidad de corriente eléctrica es el **ampere**, o **amperio**, (A). Recibió tal nombre en honor de André Marie Ampère, científico a quien se debe el término “corriente eléctrica”. Ésta es una unidad **fundamental**, de ella derivan las unidades de las demás magnitudes eléctricas, incluido, como allí vimos, el coulomb, que es la unidad de carga. En la siguiente unidad veremos cómo se establece el patrón del ampere, ahora nos limitaremos a recordar su relación con el coulomb ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$), con el cual ya estás familiarizado, y a dar los valores de intensidades de corriente en amperes en algunos casos de interés (Tabla 2.1). Esto te da una idea de lo que representa dicha unidad de corriente. En la práctica, además del amperio también se utilizan mucho algunos submúltiplos y múltiplos de él: miliampere (mA), microampere (μA) y kiloampere (kA).

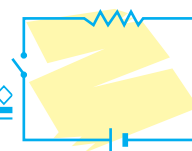


Tabla 2.1. Algunos valores característicos de intensidad de corriente

Hecho o dispositivo de interés	Intensidad de corriente (I)
Valores más bajos que pueden ser detectados	1×10^{-17} A (63 electrones por segundo)
Impulso nervioso	10 μ A
Base de un transistor común	10-100 μ A
LED habitual	20-30 mA
Valor que al pasar por el cuerpo humano puede resultar letal	0.1 A
Bombillo de filamento de 60 W	0.5 A
Bombillo de linterna de 6 V	0.8 A
Motor común para elevar agua en una casa	5 A
Hornilla eléctrica	5-9 A
Límite permisible en un fusible común de vivienda	30 A
Descarga eléctrica atmosférica	20 kA

Los instrumentos utilizados para medir la intensidad de la corriente eléctrica se denominan **amperímetros** (Fig. 2.10a). La mayoría de las veces un mismo equipo denominado **multímetro** o **polímetro** (Fig. 2.10b), puede ser utilizado para medir intensidad de corriente, voltaje, potencia, capacidad eléctrica y resistencia eléctrica.

(a)



(b)



Fig. 2.10. (a) Microamperímetro analógico (de aguja). (b) Multímetro digital, utilizado para medir, entre otras magnitudes eléctricas, intensidad de corriente.



Ejemplo 2.1. Calcula qué cantidad neta de electrones entra al filamento de un bombillo de linterna (y sale de él) en un minuto, si la intensidad de corriente es de 0.80 A. ¿Por qué se especifica, “cantidad neta de electrones”?

La intensidad de corriente es:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

De aquí que la carga neta que en un minuto entra en el filamento es:

$$\Delta q = I \Delta t = (0.80 \text{ A})(60 \text{ s}) = 48 \text{ C}$$

Como los electrones tienen una carga $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, eso significa que el número neto que entra al filamento (y sale de él) en un minuto es:

$$\frac{\Delta q}{e} = \frac{48 \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3 \times 10^{20} \text{ electrones}$$

Aún cuando no haya corriente eléctrica en el conductor, la cantidad de electrones y, por tanto de carga eléctrica, que cada segundo atraviesa una sección transversal suya es inmensa. Pero como el número de los que la atraviesa en un sentido es igual al de los que la atraviesa en sentido contrario, la **carga neta** que pasa a través de la sección transversal es nula. Una corriente eléctrica significa, que al movimiento desordenado de los electrones se añade un movimiento orientado, en determinada dirección y, en consecuencia, que el número de electrones que atraviesa la sección transversal en una dirección es mayor que en la opuesta dando por resultado una cantidad neta en determinada dirección.

2.1.4.2. Diferencia de potencial o voltaje

Con la diferencia de potencial ya te relacionaste en la unidad anterior, ahora aplicaremos lo allí estudiado a los circuitos eléctricos.

Como conoces, las fuentes o generadores en un circuito producen un exceso de partículas de carga negativa en uno de sus terminales y de carga positiva en el otro. Esto origina un **campo eléctrico a través del circuito** y una **diferencia de potencial, o voltaje**, entre sus terminales. Consideremos el circuito de la figura 2.11. Aunque en este caso la corriente se debe a los electrones, ya sabes que la convención es asumir una **corriente de partículas de**

carga positiva en sentido opuesto. Dichas partículas se encontrarían en el campo eléctrico producido por la fuente en el interior del conductor y, por eso, de modo similar que en los casos estudiados en la unidad anterior (Fig. 1.25), tienen cierta energía potencial. Las más cercanas al polo positivo poseen mayor energía potencial y las más alejadas, menor. La energía potencial por unidad de carga en cada punto del campo eléctrico es el **potencial** en esos puntos. Según se recorre el circuito del polo positivo de la fuente al negativo, el potencial disminuye, por lo que suele decirse que hay una “caída de potencial”. Así, en la situación de la figura 2.11, la diferencia de potencial entre los puntos C y A, $V_A - V_C$, es mayor que entre los puntos B y A, $V_A - V_B$.

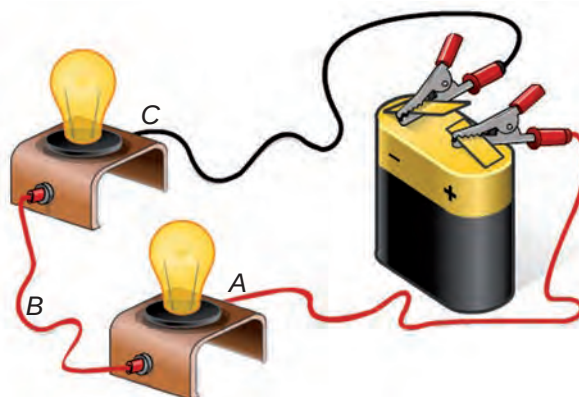


Fig. 2.11. En un circuito el potencial disminuye según se recorre del polo positivo al negativo de la fuente. La diferencia de potencial puede ser medida mediante un voltímetro.

Si los bombillos del circuito de la figura 2.11 son iguales, ¿qué diferencia de potencial debe haber entre los terminales de cada uno? Argumenta.

La diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito puede ser medida con un **voltímetro** (Fig. 2.10). Ya sabes que la unidad básica de medida del voltaje es el volt (V), pero también se emplean otras, como el milivolt (mV) y el kilovolt (kV). En la tabla 2.2 se relacionan algunos valores de voltaje de interés.



Tabla 2.2. Algunos valores característicos de voltaje.

Hecho o dispositivo de interés	Voltaje
Valor medio en un electrocardiograma	5 mV
Pila común de linterna	1.5 V
Batería de auto	12 V
Valor a partir del cual es peligrosa para el organismo humano	36 V (con la piel húmeda 12 V)
Red eléctrica de las viviendas	110 V/ 220 V
Producido por el pez anguila eléctrica	600 V
Generador de una central eléctrica habitual	26 kV
Para que se produzca una descarga eléctrica en el aire	30 kV/cm
Valor común que acelera los electrones en un tubo de pantalla	30 kV
En líneas de transmisión en una red de energía eléctrica	138 kV-765kV
Que dan lugar a descargas eléctricas atmosféricas	hasta 1 000 000 kV

Aunque las diferencias o variaciones de una magnitud suelen expresarse utilizando el símbolo Δ , al tratar con los circuitos eléctricos por lo general la diferencia de potencial entre dos puntos no se indica por ΔV , sino simplemente por V . Por ejemplo, en el caso de la situación de la figura 2.11, la diferencia de potencial (o voltaje) entre los extremos de la fuente se escribiría, en lugar de $\Delta V = 12 \text{ V}$, sencillamente $V = 12 \text{ V}$. En lo adelante utilizaremos esta notación.

La diferencia de potencial entre los terminales de los dispositivos eléctricos es uno de los factores que determina la intensidad de corriente en ellos. Esto se pone de manifiesto en un circuito tan simple como el de la figura 2.12: al elevar el voltaje de la fuente, aumentan la intensidad de corriente y la iluminación del bombillo. El voltaje determina no solo el valor de la intensidad de corriente, sino también cómo depende del tiempo. Así, en el circuito de la figura 2.13, como sabes, la corriente no es directa, sino alterna. Ello se debe a que el voltaje entre los terminales del enchufe es alterno, su dependencia con el tiempo es sinusoidal. En este caso el símbolo utilizado para la fuente o generador a la hora de dibujar el diagrama del circuito no es $\text{---}| \text{---}$, sino $\text{---}\bigcirc\text{---}$.

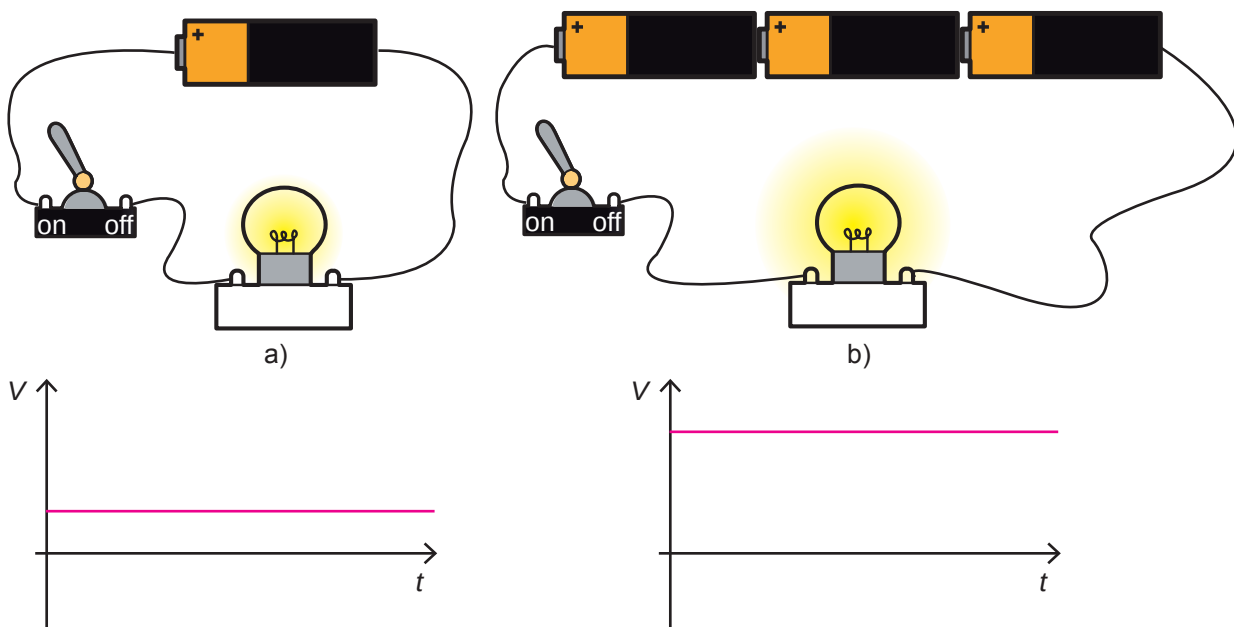


Fig. 2.12. El voltaje en los terminales de un dispositivo es uno de los factores que determina la intensidad de corriente. En (b) el bombillo es el mismo que en (a), pero el voltaje es mayor, por lo que la intensidad de corriente también.

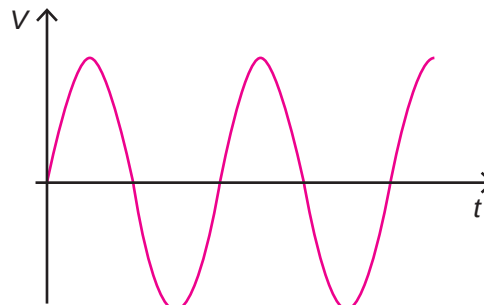
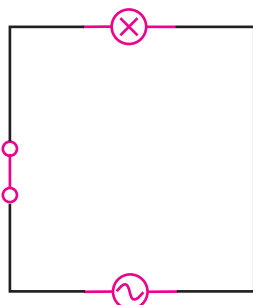


Fig. 2.13. En un bombillo conectado a un enchufe la corriente es alterna, porque el voltaje también lo es.

2.1.4.3. Potencia eléctrica

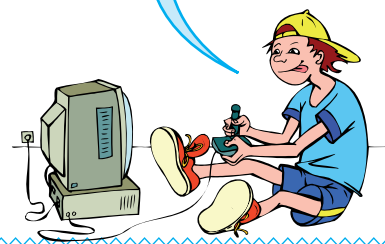
Hemos visto que las **fuentes o generadores** de electricidad en los circuitos **transforman** algún tipo de energía (interna, como en las pilas electroquímicas; cinética, como en las turbinas de las centrales; de radiación, como en los paneles solares; etc.), en energía eléctrica. A su vez, los **receptores, o consumidores, transforman** energía eléctrica en algún otro tipo de energía (de radiación luminosa, como en las lámparas; cinética, como en los motores; de ondas, como en un horno microondas o en las emisoras de radio y televisión). Y como **la magnitud que caracteriza la rapidez con que se transforma la energía es la potencia**, se tiene que:

Potencia eléctrica es la rapidez con que se transforma algún tipo de energía en energía eléctrica (en las fuentes o generadores), o ésta en otros tipos de energía (en los receptores o consumidores).

¿De qué factores dependerá la potencia que desarrolla un receptor eléctrico, o sea, la rapidez con que transforma energía eléctrica en otro tipo?

Con el objetivo de esclarecer la cuestión anterior, consideremos un circuito como el representado en la figura 2.14. El receptor, R , puede ser cualquier dispositivo, un bombillo, un motor, un acumulador que cargamos, etc.

Utiliza los términos “entrada” y “salida” para describir las funciones de las fuentes y los receptores en un circuito eléctrico. Ilustra tu descripción mediante ejemplos concretos.



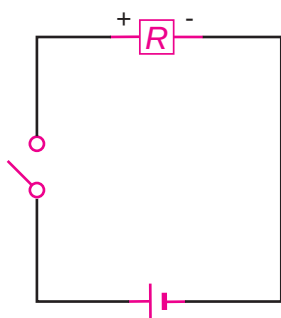


Fig. 2.14. Las partículas cargadas que entran por el terminal positivo del receptor tienen mayor energía potencial que las que salen por su terminal negativo. En el receptor tiene lugar una transformación de energía eléctrica en otros tipos de energía.

Puesto que entre los terminales del receptor hay cierta diferencia de potencial, las partículas positivas (recuerda que aunque se trate de partículas asumimos una corriente de sentido contrario positiva) que llegan a él poseen mayor energía potencial eléctrica que las que salen. ¿Cómo se explica esta disminución de energía potencial? ¿Qué sucede con la energía? Se transforma en otros tipos, por ejemplo, en térmica y luminosa si el receptor es un bombillo, en mecánica si es un motor, en química si es una batería.

Lo dicho sugiere que la energía eléctrica que por unidad de tiempo se transforma en un receptor (la potencia que desarrolla), depende al menos de dos factores: 1) de la **diferencia de potencial**, o **voltaje**, V , entre sus terminales y 2) de la cantidad neta de partículas cargadas que llega a él (y que sale de él) por unidad de tiempo, es decir, de la **intensidad de corriente**, I .

Veamos lo anterior en ecuaciones. Si Δq es la carga que llega al receptor (y sale de él) en cierto intervalo de tiempo Δt , entonces la variación de energía potencial eléctrica en ese tiempo es:

$$\Delta E_p = \Delta qV$$

Por tanto, la potencia que desarrolla el receptor es:

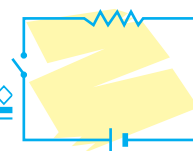
$$P = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = \frac{\Delta qV}{\Delta t} = IV$$

es decir:

$$P = IV$$

En palabras: **la potencia eléctrica que desarrolla un receptor, o una fuente, es directamente proporcional a la intensidad de corriente y a la diferencia de potencial entre sus terminales.**

Como sabes, la unidad básica de potencia es el **watt** (W), pero también se utilizan otras, como el miliwatt (mW), el kilowatt (kW) y el megawatt (MW). En la ecuación $P = IV$, si el voltaje se expresa en **voltio** y la intensidad de corriente en **ampere**, entonces la potencia se obtiene en **watt**.



Los equipos e instalaciones eléctricas traen indicado el valor de la **potencia máxima** para la que fueron diseñados (tabla 2.3). Si se sobrepasan estos valores, pueden producirse serias afectaciones.

Tabla 2.3. Valores de potencia de algunos equipos e instalaciones eléctricos.

Dispositivo o instalación eléctrica	Potencia aproximada
Auricular	5 mW
LED común	30 mW
Bombillo de linterna	5 W
Lámpara “ahorradora”	20 W
Tubos fluorescentes	20 W-40 W
Lámparas de filamento comunes	25 W-100 W
Abanico común	60 W
Televisor	50 W-150 W
Refrigerador	180 W
Lavadora simple	360 W
Plancha eléctrica	300 W-1 000 W
Hornilla eléctrica	600 W-1000 W
Acondicionador de aire	1.5 kW
Primeras centrales eléctricas (1882)	12 kW
Mayores centrales termoeléctricas	1 300 MW

Cuando se conecta un bombillo a una pila o una batería, la potencia que desarrolla permanece constante, ya que el voltaje en sus terminales y la intensidad de corriente también lo son. Sin embargo, la mayoría de los equipos eléctricos se conectan a enchufes cuyo voltaje es alterno. En consecuencia, ni el voltaje ni la intensidad de corriente permanecen constantes y, por tanto, tampoco la potencia. Incluso, cada segundo el valor de la potencia se hace cero muchas veces. Por eso, lo que tiene sentido práctico en estos casos, que son la mayoría, es la **potencia media**. Esta puede escribirse:

$$P_m = I_{ef} V_{ef}$$

donde I_{ef} y V_{ef} son aquellos valores constantes de intensidad de corriente y voltaje, que dan lugar a la misma potencia que la potencia media del voltaje y la corriente alterna. Dichos valores los denominaremos intensidad de corriente y voltaje

Busca en los manuales o en las inscripciones hechas en los propios equipos eléctricos utilizados en tu casa, la potencia para la que fueron diseñados. Compárala con la de dispositivos y equipos similares de la tabla 2.3.





efectivos. Puede demostrarse, aunque por la complejidad de las operaciones no lo haremos, que cuando se trata de **voltajes y corrientes sinusoidales** (Fig. 2.15):

$$I_{\text{ef}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707I_0 \text{ y } V_{\text{ef}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707V_0$$

Donde I_0 y V_0 son los valores máximos, o amplitudes, de corriente y voltaje, comúnmente denominados **corriente pico y voltaje pico**.

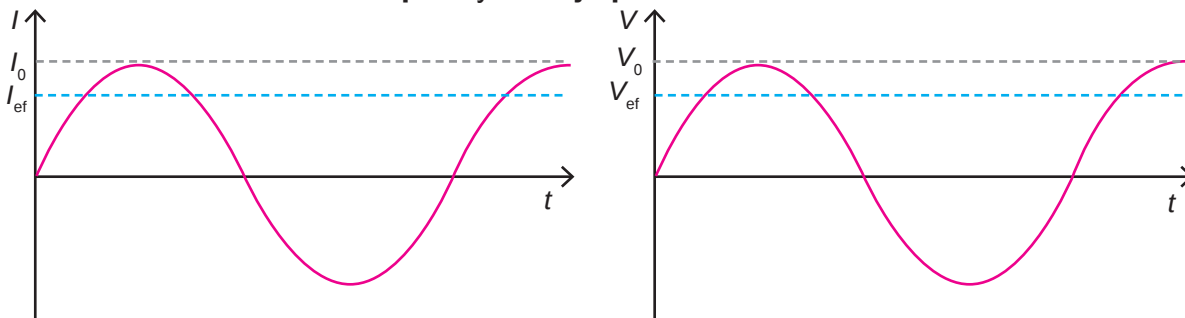


Fig. 2.15. Intensidad de corriente y voltaje sinusoidales. I_0 y V_0 son el voltaje y la corriente picos, I_{ef} y V_{ef} sus valores efectivos, es decir, aquellos que de ser constantes producen la misma potencia que la potencia media de la corriente y el voltaje sinusoidales.

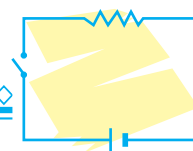
Cuando se dan el voltaje o la intensidad de corriente característicos de cierto dispositivo de corriente alterna, en realidad, aunque no se especifica, se trata de los valores efectivos, es decir, de V_{ef} y I_{ef} . Los valores que indican los instrumentos de medición de voltaje e intensidad de corriente alternos también son los efectivos. De modo que trabajaremos con la ecuación $P = VI$ en situaciones que involucren tanto corriente directa constante como corriente alterna, aunque en este último caso los valores de I y V serán los efectivos.

Ejemplo 2.2. ¿Cuáles serán los voltajes pico en los enchufes de 110 V y de 220 V?

Sabemos que $V_{\text{ef}} = 0.707V_0$

Por consiguiente, en el caso del enchufe de 110 V: $V_0 = \frac{V_{\text{ef}}}{0.707} = \frac{110 \text{ V}}{0.707} = 155 \text{ V}$

Y en el caso del enchufe de 220 V: $V_0 = \frac{V_{\text{ef}}}{0.707} = \frac{220 \text{ V}}{0.707} = 311 \text{ V}$



Ejemplo 2.3. Determina la intensidad de corriente eléctrica de: a) un bombillo de linterna de 5.0 W conectado a 6.0 V, b) un bombillo de filamento de 60 W conectado a la red de 110 V. c) ¿Cómo se explica que si en el bombillo de 60 W la intensidad de corriente es menor, la potencia que desarrolla y la radiación luminosa que emite sean mayores?

a) Para el bombillo de linterna $P = IV$, de donde:

De aquí que:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{5 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 0.83 \text{ A}$$

b) Como el bombillo de 60 W se conecta a la red de 110 V, se trata de voltaje y corriente alternos. Sin embargo, como los 110 V, aunque no se especifique, representan un voltaje efectivo, podemos utilizar la misma ecuación que en el caso anterior:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{60 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 0.55 \text{ A}$$

c) En el bombillo conectado a la red de 110 V la intensidad de corriente es menor, pero la potencia depende no solo de la intensidad de corriente, sino también del voltaje en los terminales. La diferencia de potencial en los terminales del bombillo de 60 W es mucho mayor.

Ejemplo 2.4. En una casa están funcionando simultáneamente la plancha, el tostador y la secadora de pelo que se muestran en la figura. (a) ¿Soportará el fusible si está diseñado para una corriente máxima de 30 A? (b) Y si además, se enciende el horno de microondas?

(a) La potencia total debida a los tres equipos que están funcionando es:

$$P = 1000 \text{ W} + 1100 \text{ W} + 1000 \text{ W} = 3100 \text{ W}$$

Por consiguiente, la intensidad de corriente es:

$$I = \frac{3100 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 28 \text{ A}$$

Como la intensidad de corriente es inferior a 30 A, el fusible soporta.

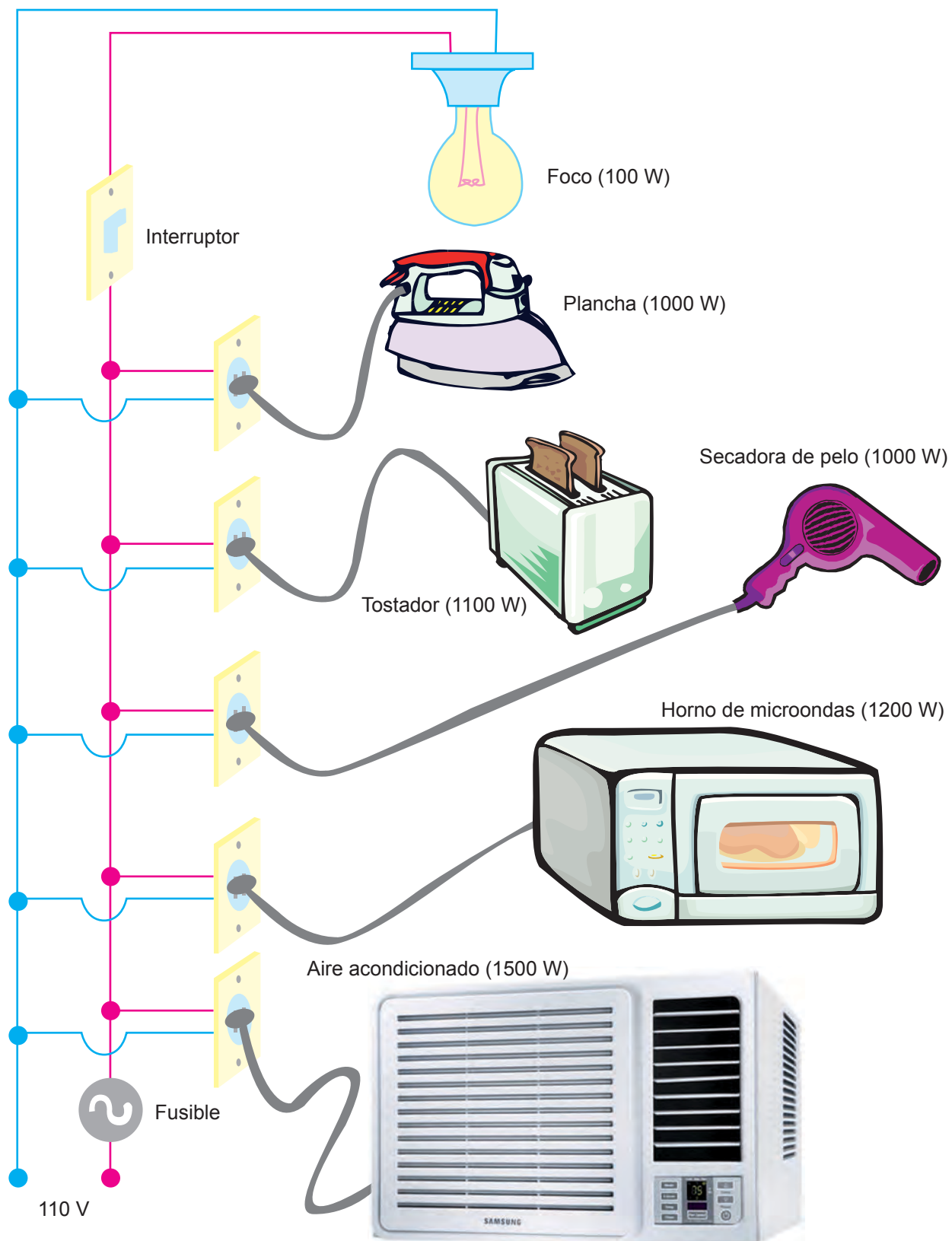
(b) Al conectar además el horno de microondas la potencia total es:

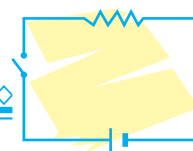
$$P = 3100 \text{ W} + 1200 \text{ W} = 4300 \text{ W}$$

Y la intensidad de corriente

$$I = \frac{4300 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 39 \text{ A}$$

El fusible no soporta.





2.1.4.4. Fuerza electromotriz

Hemos visto que las pilas electroquímicas, las baterías, las celdas solares y otros dispositivos, producen y mantienen una acumulación de carga de signos contrarios en sus terminales, y que esto puede originar un campo eléctrico en el interior de los conductores y, por tanto, una corriente eléctrica. Los generadores de las centrales eléctricas también producen tal acumulación de cargas en sus terminales, gracias a la fuerza ejercida sobre los electrones de sus conductores al moverse en un campo magnético. Estos generadores los estudiaremos en la última unidad. Todos estos dispositivos transforman algún tipo de energía en energía potencial eléctrica.

Los dispositivos que transforman algún tipo de energía (interna, de radiación, térmica, mecánica) en energía potencial eléctrica se denominan con el término genérico *fuentes de fem*. La *fem* (ϵ) en sí misma expresa la *energía que se transforma por cada unidad de carga acumulada en los terminales del dispositivo*.

Las tres letras **f e m** son una abreviatura de “fuerza electromotriz”, término que no refleja adecuadamente el proceso que tiene lugar en las fuentes, ya que no se trata de una fuerza en el sentido usual de esta palabra, sino como hemos dicho, de **energía que se transforma por unidad de carga acumulada**. El término se introdujo hace mucho, cuando aún no se había comprendido bien el funcionamiento de las fuentes, pero se continúa utilizando.

Puesto que la **fem**, igual que el potencial, es energía por unidad de carga, ella también se mide en **voltio**. Sin embargo, estas magnitudes se diferencian una de la otra. Así, cuando se mide con un voltímetro la diferencia de potencial entre los extremos de una pila común, el resultado será 1.5 V (Fig. 2.16a). Sin embargo, si la pila se conecta a un receptor (Fig. 2.16b) y la intensidad de corriente en el circuito es grande, entonces el resultado será inferior. La **fem** de la pila coincide con la diferencia de potencial en sus terminales solo cuando el circuito está abierto, o la intensidad de corriente es muy pequeña. ¿Cómo se explica esto?

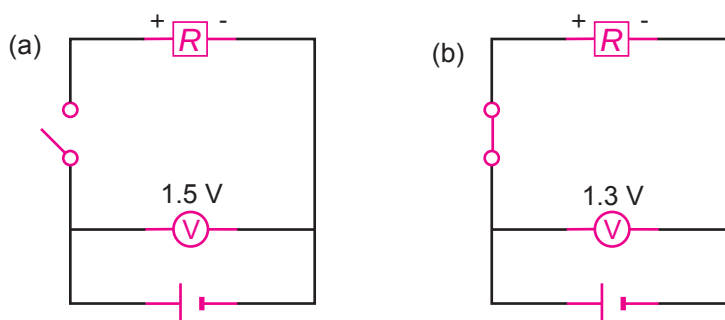
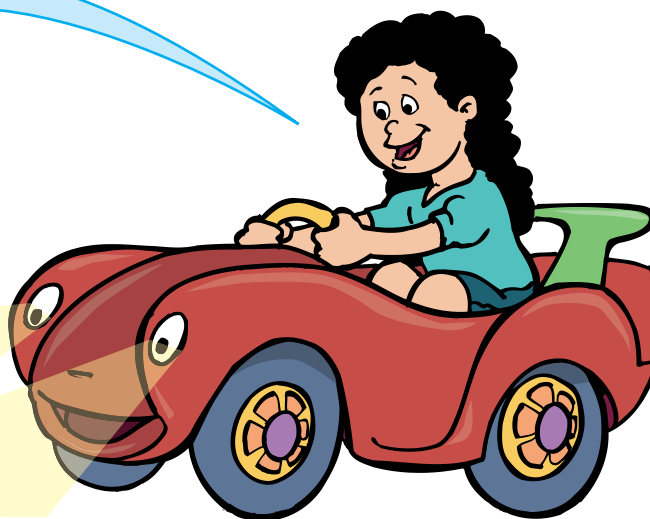
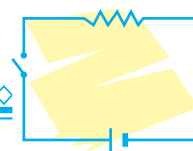


Fig. 2.16. (a) El circuito está abierto y el voltímetro indica la fem de la pila, (b) El circuito está cerrado y el voltímetro indica un valor inferior a la fem de la pila.

Cuando la corriente es grande, la pila no logra restablecer completamente la acumulación de carga en sus terminales, ni por tanto la diferencia de potencial entre ellos. Las partículas cargadas deben moverse en el interior de la pila no solo en contra de la fuerza del campo eléctrico originado por la propia acumulación de carga en sus terminales, sino también en contra de la resistencia que les presentan los átomos y moléculas entre los que se mueven. Si esta resistencia es muy pequeña, entonces la **fem** de la pila prácticamente coincide con la diferencia de potencial entre sus extremos, aún cuando el circuito estuviese cerrado. En los próximos apartados profundizaremos en esta cuestión.

Cuando se acciona el arrancador de un carro con sus faros encendidos, se aprecia una disminución de la cantidad de luz. ¿Qué indica eso acerca del voltaje en los terminales de la batería? ¿Cómo se explica esto?





2.2. Corriente eléctrica en diversos medios

Los buenos conductores de la electricidad se caracterizan por poseer **gran cantidad de partículas libres con carga eléctrica**. Entre ellos se encuentran los **metales**, los **electrolitos** en disoluciones acuosas y fundidos, y los **gases ionizados**. Los materiales no conductores o aisladores se denominan, como sabes, **dieléctricos**. En comparación con los conductores ellos poseen un número muy pequeño de partículas libres cargadas.

Además de los conductores y dieléctricos, hay otro grupo de materiales cuya conductividad eléctrica ocupa un lugar intermedio entre los conductores y los dieléctricos. No conducen la electricidad tan bien como para llamarse conductores, pero tampoco tan mal como para considerarse dieléctricos, por lo que se han denominado **semiconductores**.

La intensidad de corriente en los metales, electrolitos, gases ionizados y semiconductores, depende de dos factores fundamentales: 1) el **campo eléctrico** que se establece en ellos por medio de una fuente, o lo que es equivalente, la **diferencia de potencial** a que se someten y 2) las **características propias de los materiales**.

A continuación examinamos la naturaleza y las características de la corriente eléctrica en los tipos de materiales anteriormente mencionados.

2.2.1. Corriente eléctrica en los metales. Ley de Ohm

Los conductores metálicos desempeñan un importantísimo papel en la transmisión de la energía eléctrica de las fuentes hasta los numerosos equipos eléctricos que se utilizan diariamente. Además, forman parte esencial de la construcción de motores, generadores, calentadores eléctricos y otros equipos.

Como sabes, en los metales hay una enorme cantidad de electrones libres moviéndose desordenadamente. Un centímetro cúbico de cobre, por ejemplo, contiene 8.4×10^{22} de

Ejemplifica el uso de los conductores metálicos para las transmisión de energía eléctrica.





tales electrones, los cuales a la temperatura ambiente se mueven aleatoriamente con una velocidad media de más de 1000 km/s. Analicemos desde el punto de vista microscópico lo que sucede cuando se conecta una fuente de **fem** a los extremos de un conductor metálico.

La fuente origina un campo eléctrico en el interior del conductor y al movimiento desordenado que tenían sus electrones libres, ahora se adiciona un movimiento dirigido hacia el polo positivo de la fuente. Si la diferencia de potencial entre los extremos del conductor permanece constante, la velocidad media del movimiento orientado de los electrones alcanza cierto valor y luego se mantiene constante. Los electrones continuamente chocan con los iones de la red de iones a través de la cual se desplazan y esto impide que dicha velocidad crezca. La resistencia que presentan los iones al movimiento orientado de los electrones es análoga a la que presenta el agua al movimiento de una piedra que se deja caer a través de ella. Los electrones continuamente transmiten la energía cinética que reciben del campo eléctrico a los iones de la red, lo que puede conducir al calentamiento del conductor.

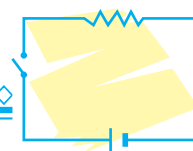
El análisis anterior sugiere importantes conclusiones acerca de las magnitudes de que depende la intensidad de corriente en los conductores metálicos y la forma de estas dependencias.

La velocidad media del movimiento orientado de los electrones libres, v_m , es proporcional a la intensidad del campo eléctrico y, por tanto, a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor. En símbolos:

$$v_m \propto V$$

Y puesto que la intensidad de corriente es, a su vez, proporcional a la velocidad media del movimiento de los electrones, se tiene:

$$I \propto V$$

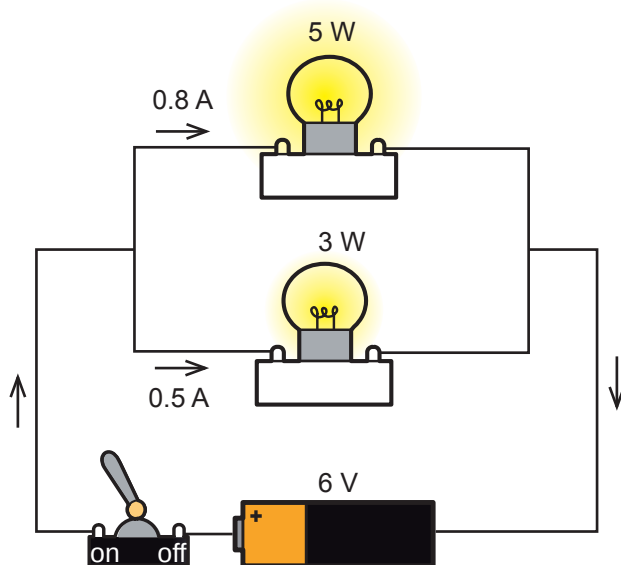


La relación de proporcionalidad directa, independientemente de la polaridad de la fuente, entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial en los extremos de un conductor se denomina **ley de Ohm**, en honor de Georg S. Ohm, científico alemán que llegó a ella experimentalmente en 1827 para los conductores metálicos.

Pero la intensidad de corriente en los conductores depende, obviamente, no solo de un factor externo, la fuente de **fem**, sino también de **características propias de los conductores**. Así, al aplicar igual voltaje a los extremos de diferentes conductores metálicos, la intensidad de corriente no es la misma. Esto se hace evidente en un circuito como el representado en la figura 2.17. La diferencia de potencial en los extremos de los filamentos de ambos bombillos es igual, pero en el filamento del que da más luz la intensidad de corriente es mayor. Del filamento en que la intensidad de corriente es menor se dice que tiene mayor resistencia a la corriente eléctrica, o simplemente, mayor **resistencia eléctrica**.



Georg S. Ohm (1787-1854). Físico alemán, conocido sobre todo por sus investigaciones relativas a la corriente eléctrica. En su honor, la relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente en un conductor y la diferencia de potencial entre sus extremos se denomina *ley de Ohm* y la unidad de resistencia eléctrica, *ohm*.



Realiza los cálculos y comprueba que en el diagrama de la figura 2.17 las intensidades de corriente en los bombillos son las indicadas.



Fig. 2.17. La diferencia de potencial en los extremos de los filamentos de ambos bombillos es la misma, pero las intensidades de corriente son diferentes porque dependen de las características de dichos filamentos.

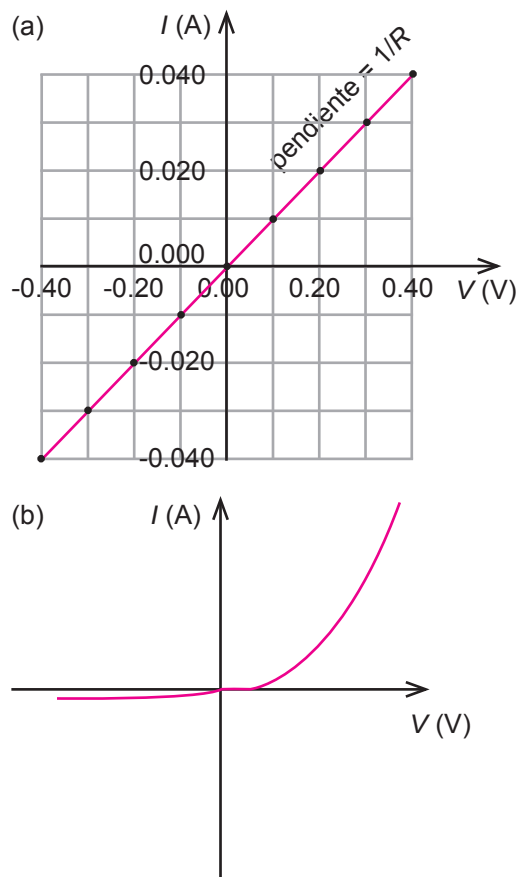


Fig. 2.18. Características volt-ampéricas de: (a) un conductor metálico, (b) un diodo semiconductor. El conductor metálico es un dispositivo óhmico mientras que el diodo semiconductor, no.

Determina la resistencia eléctrica del conductor metálico cuya característica volt-ampérica se representó en la figura 2.18a.



La **resistencia eléctrica** de un conductor representa una medida de su oposición al establecimiento de una corriente eléctrica en él y se define como:

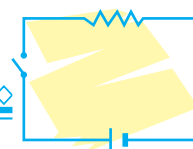
$$R = \frac{V}{I}$$

Según esta ecuación, la unidad de resistencia eléctrica es 1 V/A. Esta unidad recibe el nombre especial de **ohm**, y se simboliza por la letra mayúscula griega, **omega** (Ω).

La ecuación anterior también puede escribirse:

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

Esta es la forma más habitual de escribir **la ley de Ohm**, es decir, la proporcionalidad entre I y V . Claro está, **la ley se cumple solo si R permanece constante**, hecho que como hemos dicho encontró Ohm para los conductores metálicos, pero que no se cumple para otros muchos dispositivos eléctricos, y ni siquiera para los propios conductores metálicos si el paso de la corriente los calienta, como es el caso, por ejemplo, del filamento de los bombillos. En la figura 2.18 se muestran los gráficos de $I(V)$ para un conductor metálico cuya temperatura permanece constante y para un **diodo semiconductor**. La dependencia entre I y V para un dispositivo eléctrico suele denominarse **característica volt-ampérica** del dispositivo. Si ésta es una línea recta que pasa por el origen, como para un conductor metálico cuya temperatura no varía (Fig. 2.18a), significa que el dispositivo cumple con la ley de Ohm y se dice que es **óhmico**. Un diodo semiconductor es un dispositivo no óhmico, pues no cumple con la ley de Ohm (Fig. 2.18b). La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos son no óhmicos.



Ejemplo 2.5. Determina la resistencia eléctrica del filamento de los bombillos representados en la figura 2.17.

La ecuación de definición de la resistencia eléctrica es $R = V/I$. La diferencia de potencial V en los extremos de los filamentos de los bombillos se conoce, pero la intensidad de corriente I debe ser hallada. De la ecuación $P = IV$:

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

Sustituyendo esta expresión en la ecuación de definición de la resistencia:

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

Colocando los valores numéricos en la ecuación se tiene:

Para el bombillo de 5 W: $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(6 \text{ V})^2}{5 \text{ W}} = 7 \Omega$

Para el bombillo de 3 W: $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(6 \text{ V})^2}{3 \text{ W}} = 12 \Omega$

Nota que, al contrario de lo que a veces se piensa, el bombillo de menor resistencia es el que ilumina más. Siendo igual la diferencia de potencial en los terminales de ambos bombillos, la intensidad de corriente es mayor en el que tiene menor resistencia.

Cabe ahora preguntarse: *¿y de qué características de los conductores metálicos depende la resistencia eléctrica?*

Razonando a partir de los conocimientos que ya tienes, seguramente puedes llegar a algunas **hipótesis** al respecto.

Imagina primeramente dos pedazos de un mismo alambre, de diferentes longitudes (Fig. 2.19a). Si se aplican entre sus extremos iguales diferencias de potencial, en el más largo la intensidad de campo eléctrico será menor (Te dejamos de tarea que argumentes por qué). Ello implica que la velocidad media del movimiento orientado de sus electrones libres y, por tanto, la intensidad de corriente, también es menor. Puesto que con la misma diferencia de potencial V entre sus extremos, la intensidad de corriente



es menor en el alambre más largo, entonces, según la ecuación $R = V/I$, dicho alambre tendrá mayor resistencia eléctrica. La hipótesis a que llegamos podría ser, pues, que **la resistencia eléctrica es proporcional a la longitud del conductor** ($R \propto L$)

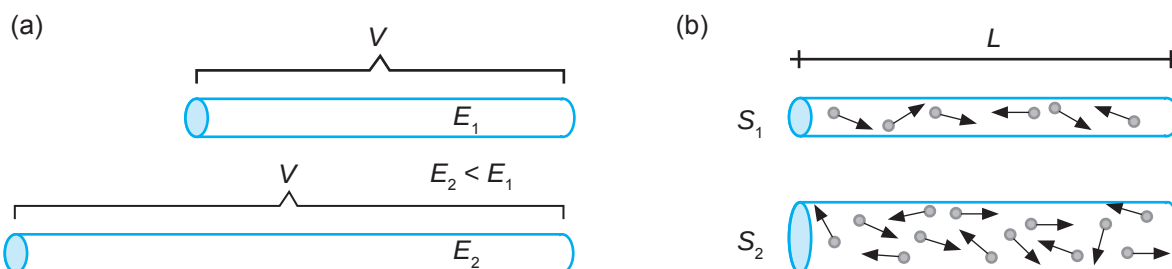
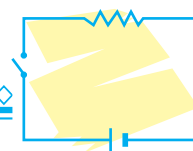


Fig. 2.19. (a) Si aplican iguales diferencias de potencial entre los extremos de dos pedazos con diferentes longitudes de un mismo alambre, la intensidad de campo eléctrico será menor en el alambre de mayor longitud. (b) En el alambre más grueso hay más electrones libres disponibles para atravesar su sección transversal.

Si ahora piensas en dos alambres de un mismo material e iguales longitudes, pero uno más grueso que el otro (Fig. 2.19b), es decir, con mayor área de su sección transversal, no te será difícil admitir que en el más grueso hay más electrones libres disponibles para atravesar la sección transversal, por lo que al aplicar iguales diferencias de potencial a sus extremos, la intensidad de corriente debe ser mayor. Ahora la hipótesis puede ser que **la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del conductor** ($R \propto 1/S$)

La interpretación microscópica de la corriente eléctrica en los metales también lleva a suponer que **la resistencia eléctrica depende de la naturaleza del material**. En particular, en uno que tenga mayor cantidad de electrones libres por unidad de volumen y en que los electrones se muevan más fácilmente a través de la red de iones, la resistencia debe ser menor. Por último, como al aumentar la temperatura aumenta la velocidad media del movimiento desordenado de los iones de la red de iones y de los propios electrones, es de esperar que la resistencia eléctrica aumente con la temperatura.



Los experimentos confirman las hipótesis anteriores. La resistencia eléctrica de un conductor metálico de longitud L con igual área S de su sección transversal a todo su largo es:

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

donde el coeficiente ρ , denominado **resistividad eléctrica**, depende del material y también de la temperatura. Así, por ejemplo, un alambre de **wolframio**, también denominado **tungsteno**, que es el metal de que están constituidos los filamentos de los bombillos, tiene una resistividad más de tres veces mayor que la del cobre. El **nicromo**, aleación de níquel y cromo utilizada en algunos elementos calefactores, posee una resistividad más de 100 veces mayor que la del cobre. Por otra parte, a la temperatura de 3 000 °C que puede alcanzar el filamento de un bombillo su resistividad aumenta unas 10 veces en comparación con la que tiene a temperatura ambiente.

¿A qué crees tú que se deba la utilización del wolframio para confeccionar los filamentos de los bombillos?

¿Podrías hacer estimados de las resistencias a temperatura ambiente de los bombillos de la experiencia representada en la figura 2.17 (Utiliza los resultados obtenidos en el ejemplo 2.5).



Ejemplo 2.6. Imagina que vas a conectar las bocinas de tu equipo estéreo a gran distancia de él y que para ello utilizarás alambres de cobre de 20 m. a) Si se requiere que la resistencia de cada alambre sea de 0.10 Ω (o inferior), ¿qué diámetro deben tener los alambres? b) Si la intensidad de corriente en cada bocina es 2.0 A, ¿cuál es la diferencia de potencial, o caída de voltaje, en cada alambre en caso que la resistencia de ellos sea 0.10 Ω ? La resistividad del cobre es $\rho = 1.68 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$.

La resistencia del alambre de cobre es:

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

De aquí que:

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

Por consiguiente, para que un alambre de cobre de 20 m de largo tenga una resistencia de 0.10 Ω el área de su sección transversal debe ser:



$$S = \rho \frac{L}{R} = 1.68 \times 10^{-8} \, \Omega \text{m} \frac{20 \, \text{m}}{0.10 \, \Omega} = 3.36 \times 10^{-6} \, \text{m}^2$$

Como la sección transversal del alambre es circular, el área es:

$$S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2, \text{ donde } d \text{ es el diámetro del alambre}$$

Resolviendo para d :

$$d = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{3.36 \times 10^{-6} \, \text{m}^2}{\pi}} = 2.1 \times 10^{-3} \, \text{m} = 2.1 \, \text{mm}$$

b) Puesto que $I = \frac{V}{R}$, se tiene:

$$V = RI = (0.10 \, \Omega)(2.0 \, \text{A}) = 0.20 \, \text{V}$$

2.2.2. Corriente eléctrica en los electrólitos

Como los sólidos, hay líquidos dieléctricos, conductores y semiconductores. El agua destilada, por ejemplo, es un dieléctrico, es decir, no conductora. Sin embargo, si se disuelve en ella un **electrolito** (ácidos, bases, sales), entonces se vuelve conductora. Bajo la acción de las moléculas polares del agua, las moléculas del electrolito se separan en iones. Los iones positivos y negativos que aparecen en el agua son las partículas cargadas que originan la corriente eléctrica en los electrolitos. La proporción de moléculas que se separan en iones depende de la concentración de la disolución y de su temperatura. Con el aumento de esta última, aumenta la disociación de las moléculas y la cantidad de iones en el líquido, por eso, a diferencia de lo que ocurre en los metales, al aumentar la temperatura de una disolución electrolítica crece la concentración de partículas cargadas y disminuye su resistencia eléctrica.

Cuando se conecta una fuente de corriente directa a una disolución electrolítica (Fig. 2.20), los iones negativos (aniones) comienzan a moverse hacia el electrodo positivo

(ánodo) y los iones positivos (cationes) hacia el electrodo negativo (cátodo). Como resultado de esto, se establece una corriente eléctrica. A diferencia de los metales, en este caso la corriente eléctrica conlleva un **transporte de sustancia**. En los electrodos introducidos en la disolución, tiene lugar la separación de las sustancias que forman el electrolito, en el electrodo positivo los iones negativos entregan sus electrones en exceso y en el negativo, los iones positivos adquieren los electrones que les faltan. Este proceso se conoce como **electrólisis**.

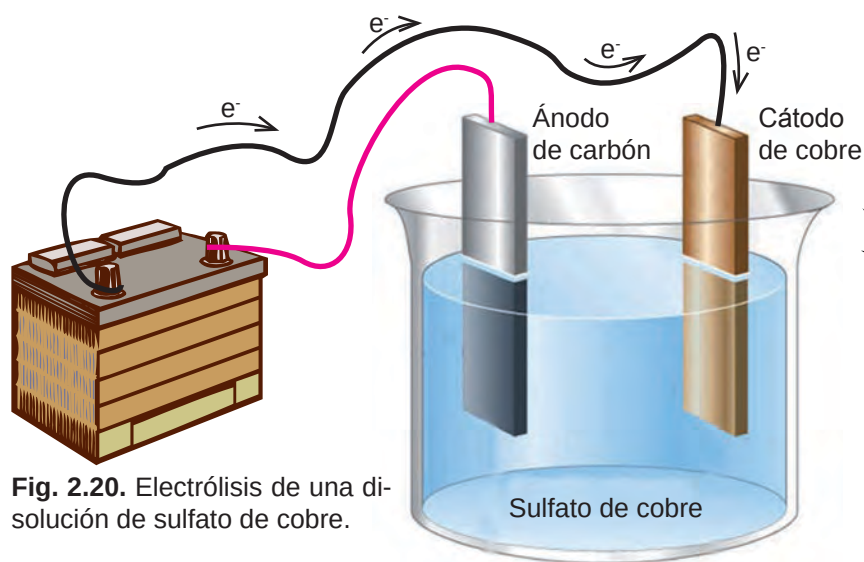


Fig. 2.20. Electrólisis de una disolución de sulfato de cobre.

Si la temperatura del electrolito permanece constante, la dependencia entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial de los electrodos, $I(V)$, cumple con la ley de Ohm. El gráfico de la característica volt-ampérica de un electrolito es una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, igual que en los conductores metálicos cuando la temperatura de ellos se mantiene constante.

La electrólisis tiene múltiples aplicaciones tecnológicas. Por medio de ella es posible recubrir un cuerpo metálico con una fina capa de otro metal (Fig. 2.21), como por ejemplo, en el niquelado o el cromado. Estos recubrimientos protegen las superficies de la corrosión y le dan belleza. Con ayuda de la electrólisis pueden librarse de impurezas ciertos metales. La obtención del aluminio, tan utilizado hoy en la tecnología y la vida diaria, se realiza mediante electrólisis a partir de la bauxita.

¿Por qué en el texto se especificará que la fuente que se conecta a la disolución electrolítica para realizar su electrólisis es de corriente directa? ¿Qué sucedería si la corriente fuese alterna?





Fig. 2.21. Recubrimiento de cuerpos con una capa de metal mediante electrólisis.

Indaga en Internet sobre las aplicaciones de la electrólisis.



¿De qué depende la masa de sustancia obtenida en los electrodos durante una electrólisis?

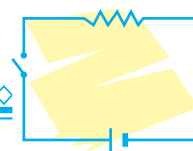
Es evidente que de la cantidad de carga entregada, u obtenida, por los electrodos. Si la intensidad de la corriente eléctrica que pasa por el electrolito es I , entonces al cabo del tiempo Δt dicha carga será:

$$\Delta q = I \Delta t$$

Esta carga, dividida entre la de un ión, q_{ion} , da el número de iones que se neutraliza en cada electrodo, es decir, el número N de átomos o moléculas que se obtiene:

$$N = \frac{\Delta q}{q_{\text{ion}}} = \frac{I \Delta t}{q_{\text{ion}}}$$

A su vez, la carga q_{ion} de cada ión depende del número de electrones en exceso o defecto que él posee, es decir, de su valencia n . Así, al disociarse la molécula de sal común,



ClNa, aparecen los iones Cl^- y Na^+ ($n = 1$), con cargas de igual magnitud que la del electrón. Pero al disociarse la molécula de sulfato de cobre, los iones son Cu^{2+} y SO_4^{2-} ($n = 2$), con cargas dos veces la del electrón. En general:

$$q_{\text{ion}} = ne$$

Por consiguiente:

$$N = \frac{I\Delta t}{ne}$$

Si ahora multiplicamos el número N de átomos, o moléculas, obtenido en uno de los electrodos por la masa m de cada átomo, o molécula, se tiene la masa M de sustancia separada del electrolito.

$$M = Nm = \frac{mI\Delta t}{ne} = \left(\frac{m}{ne} \right) I\Delta t$$

Observa que la expresión entre paréntesis es constante para cada electrolito. Si la designamos por k puede escribirse:

$$M = kI\Delta t$$

En palabras:

La masa de sustancia obtenida en cada electrodo durante una electrólisis es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica y al tiempo.

Esta conclusión, a la que hemos llegado teóricamente, fue establecida por primera vez, experimentalmente, por Faraday y por eso se denomina **ley de Faraday de la electrólisis**.

La constante $k = m/ne$ se denomina **equivalente electroquímico** y tiene una interpretación física simple: puesto que m es la masa de un ión y ne su carga, entonces **el equivalente electroquímico es el cociente entre la masa y la carga del ión**.

Nota que en la expresión $M = (m/ne)I\Delta t$ interviene la carga e del electrón. Por eso, midiendo la masa M de sustancia obtenida en el electrodo, la intensidad de la corriente I y



el tiempo Δt durante el que pasa, es posible determinar la carga del electrón. Los valores de las otras magnitudes, la masa m de los átomos, o moléculas, separados del electrolito y la valencia n , son conocidos. En el apartado dedicado a las actividades prácticas, al final del libro, se describe una práctica de laboratorio para determinar la carga del electrón.

Ejemplo 2.7. En una solución de sulfato de cobre se introducen dos electrodos de cobre y se hace pasar una corriente constante de 1.8 A durante 30 min. La masa del electrodo negativo antes de la electrólisis era 15.2 g y después 16.3 g. Determina la carga del electrón. La masa de un átomo de cobre es 1.05×10^{-25} kg, la valencia del ión de cobre 2 y la carga del electrón 1.6×10^{-19} C.

La masa de sustancia depositada en el electrodo negativo es:

$$M = \left(\frac{m}{ne} \right) I \Delta t$$

Donde m es la masa del átomo de sustancia depositada, n la valencia de su ión, e la carga del electrón, I la intensidad de corriente y Δt el tiempo durante el que pasa.

Resolviendo la ecuación para e se tiene:

$$e = \frac{m I \Delta t}{n M}$$

La masa de cobre depositada en el electrodo es:

$$M = 16.3 \text{ g} - 15.2 \text{ g} = 1.1 \text{ g} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

El tiempo durante el cual pasa la corriente:

$$\Delta t = 30 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1800 \text{ s}$$

Sustituyendo todos los datos en la ecuación:

$$e = \frac{m I \Delta t}{n M} = \frac{(1.05 \times 10^{-25} \text{ kg})(1.8 \text{ A})(1800 \text{ s})}{(2)(1.1 \times 10^{-3} \text{ kg})}$$

$$e = 1.5 \times 10^{-19} \text{ C}$$

La diferencia entre este valor y el conocido por ti, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, probablemente se debe a que la masa no se midió con gran precisión, sino solo hasta las décimas de gramo.

2.2.3. Corriente eléctrica en los gases

Electriza dos tiras de acetato frotándolas y luego suspéndelas, agarrándolas juntas por un extremo con dos dedos (Fig. 2.22a). Las tiras se separan formando una V invertida. Si ahora calientas el aire entre ellas, por ejemplo, acercando por abajo un cerillo encendido (Fig. 2.22b), las tiras se aproximan rápidamente, lo que evidencia que se **descargan** y, por tanto, que pasa corriente eléctrica a través del aire. El paso de corriente eléctrica a través de un gas se denomina **descarga eléctrica**.

Los gases pueden hacerse conductores no solo calentándolos, sino también mediante radiación: ultravioleta, de rayos X, radiactiva. ¿Cómo se explica esto? En las condiciones habituales, los gases están constituidos casi por completo por átomos o moléculas neutros y, por tanto, son dieléctricos. Sin embargo, el calentamiento o la radiación, hacen que parte de sus átomos emitan electrones, con lo cual aparecen iones positivos y electrones. Pueden incluso formarse también iones negativos, producto de la unión de electrones emitidos con átomos neutros. La naturaleza de la corriente eléctrica en los gases es similar a la de los electrolitos. La diferencia básica consiste en que mientras en los electrolitos los portadores de carga, tanto negativa como positiva son iones, **en los gases los portadores de carga son iones y electrones**.

Para estudiar las características de la corriente eléctrica en los gases puede utilizarse un tubo de vidrio que contiene gas y que tiene un electrodo en cada extremo, los cuales se conectan a una fuente de fem (Fig. 2.23). Supongamos ahora que el gas en el interior del tubo se ioniza, utilizando por ejemplo radiación. En la figura 2.24 se muestra la forma que tiene el gráfico de la **característica voltampérica**. Cuando se eleva la diferencia de potencial entre los electrodos, al principio la intensidad de corriente aumenta proporcionalmente (se cumple la ley de Ohm). En ese intervalo, la cantidad de partículas cargadas disponibles es mayor que la necesaria para la corriente eléctrica. Sin embargo, al crecer la intensidad de corriente, llega un momento que la cantidad de partículas cargadas que

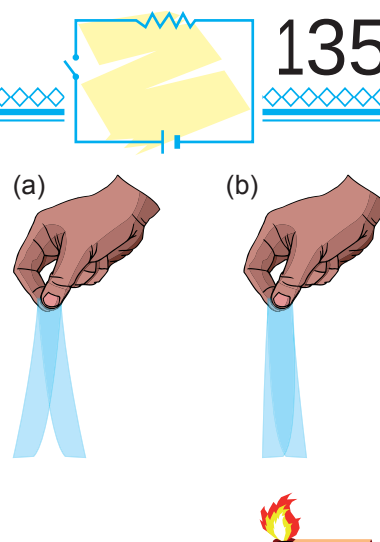
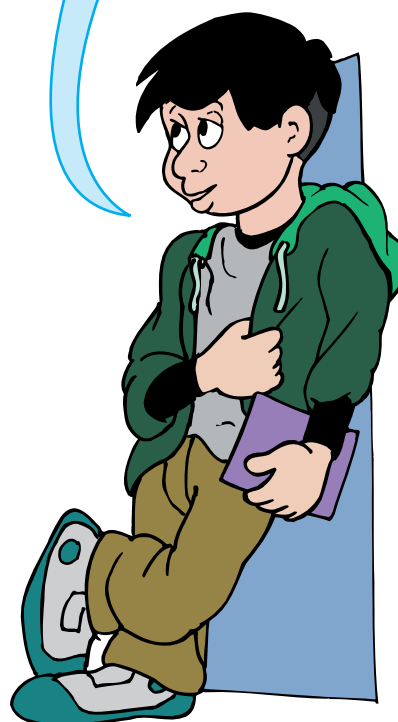


Fig. 2.22. (a) Dos tiras de acetato electrizadas con cargas del mismo signo se mantienen separadas, lo que muestra que el aire es dieléctrico, (b) al calentar el aire, las tiras se descargan, lo que evidencia que el aire se ha vuelto conductor.

¿Cómo pudieras explicar desde el punto de vista microscópico la ionización de un gas al ser calentado?





arriba a los electrodos en la unidad de tiempo, se iguala a la cantidad generada en ese tiempo y entonces la posterior elevación del voltaje ya no puede producir un aumento de la intensidad de corriente. Se dice que la corriente ha alcanzado la **saturación**. Si la acción del ionizador cesa, desaparece la corriente eléctrica, por lo que este tipo de corriente en los gases suele denominarse **corriente o descarga mantenida**.

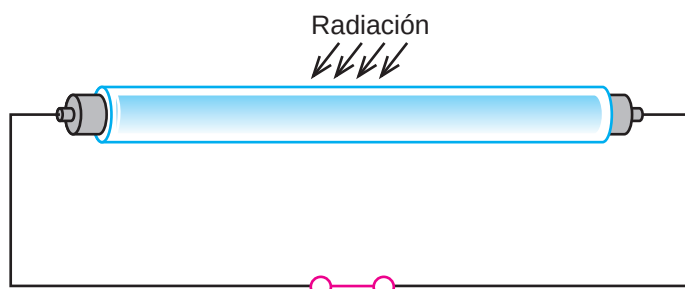


Fig. 2.23. Esquema de un dispositivo que permite estudiar la corriente eléctrica en los gases.

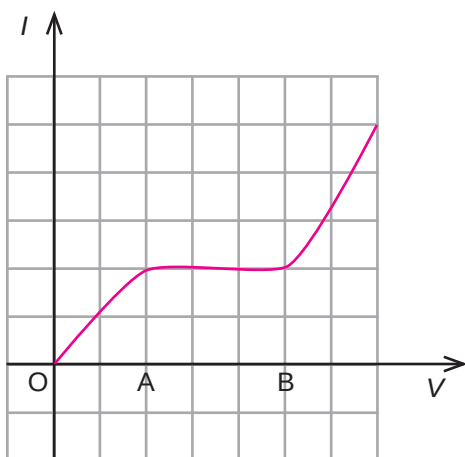
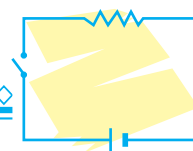


Fig. 2.24. Característica voltampérica de un gas contenido en un tubo y sometido a un agente ionizante. El tramo OAB corresponde a la corriente mantenida, ya que requiere del ionizador. A partir de B la corriente es automantenida, fundamentalmente debido a la emisión de electrones por el electrodo negativo.

¿Qué sucede si se continúa elevando el voltaje entre los electrodos? La experiencia muestra que a partir de cierto valor la intensidad de corriente nuevamente crece. Esto indica que han comenzado a generarse más partículas cargadas que las que origina el agente ionizador. La intensidad de corriente puede hacerse cientos y miles de veces mayor que la de saturación y la cantidad de partículas con cargas tan grande, que incluso ya no se necesite la acción del ionizador para mantener la corriente. Si en estas condiciones el ionizador se retira, la corriente se mantiene. Por eso este tipo de corriente en los gases se denomina **corriente o descarga automantenida**.

¿Cómo se explica el nuevo aumento de la intensidad de corriente luego de la saturación? En el camino hacia el electrodo positivo, los electrones constantemente chocan con iones y átomos neutros, pero al elevar el voltaje, aumenta la intensidad de campo eléctrico en el gas, y con ella la energía que adquieren los electrones entre un choque y el siguiente. Esta energía puede llegar a ser tal, que al chocar el electrón con un átomo neutro lo ionice, es decir, que haga que pierda un electrón. Como resultado de esto, el número de partículas cargadas aumenta y la intensidad de corriente comienza a crecer. Sin embargo, comprenderás que tal aumento de la intensidad de corriente no puede mantenerse a costa de la



ionización de los átomos del gas. Llegaría un momento en que todos los electrones emitidos por los átomos neutros han llegado al electrodo positivo y desaparecido del gas. El aumento de la intensidad de corriente se mantiene debido a que **el electrodo negativo emite electrones**. Al elevarse la diferencia de potencial, no solo aumenta la energía de los electrones sino también la de los iones que viajan hacia el electrodo negativo. Sus choques a grandes velocidades con el electrodo negativo pueden originar que este emita electrones debido a dos factores: 1) los choques en sí mismos y 2) el calentamiento del electrodo provocado por los choques.

Indaga en alguna enciclopedia acerca del funcionamiento del arco eléctrico y la lámpara fluorescente.



En muchos casos de corriente eléctrica en los gases, como por ejemplo en las lámparas fluorescentes y en los arcos eléctricos, el calentamiento de los electrodos con la consiguiente emisión de electrones es condición previa para que se inicie la corriente eléctrica en el gas. El calentamiento de los electrodos se realiza haciendo pasar por ellos corriente eléctrica.

2.2.4. Corriente eléctrica en los semiconductores

Los semiconductores pueden ser elementos químicos, como el silicio (Si), el germanio (Ge) y el selenio (Se), o compuestos, como el sulfuro de cadmio (CdS), el sulfuro de plomo (PbS) y otros.

Una de las características esenciales de los semiconductores es la disminución de la resistividad ρ con el aumento de temperatura. La figura 2.25 muestra la forma del gráfico de dependencia de la resistividad con la temperatura para un semiconductor.

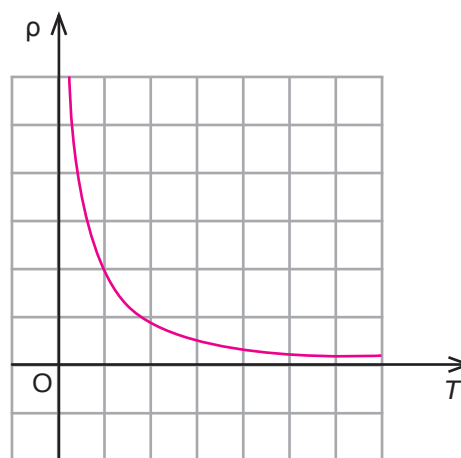


Fig. 2.25. Una característica esencial de los semiconductores es la rápida disminución de la resistividad con la temperatura.

¿Cómo se explica la disminución de la resistividad con la temperatura? Ya sabes que la disponibilidad de partículas libres cargadas en un material determina su resistividad. Por consiguiente, es de esperar que al aumentar la temperatura del semiconductor aumente la cantidad de partículas libres cargadas en él. Y en efecto, eso es lo que ocurre, veamos la razón.



Consideremos como ejemplos de semiconductores el silicio y el germanio. La valencia de estos elementos es 4, lo que significa que en la capa electrónica más externa de sus átomos hay esa cantidad de electrones. Estos electrones dan lugar a enlaces covalentes entre los átomos, cada uno se enlaza con otros cuatro, constituyendo una estructura cristalina (Fig. 2.26a). Cabe subrayar que al formarse estos enlaces, los electrones de valencia de un átomo dado dejan de pertenecer a ese átomo, ni siquiera pertenecen a dos átomos, se mueven por cada uno de los vecinos. Más aún, al llegar a uno de los átomos vecinos, pueden desplazarse hasta el vecino siguiente y así sucesivamente. Este desplazamiento de los electrones por la red de enlaces es desordenado. De modo que los electrones de valencia, similarmente a lo que ocurre en los metales, no pertenecen a un átomo determinado, sino a la red, **pero a diferencia de los metales, si la temperatura es muy baja no constituyen electrones libres, permanecen bien ligados a la red de enlaces**. Esto explica por qué a bajas temperaturas el silicio y el germanio son dieléctricos.

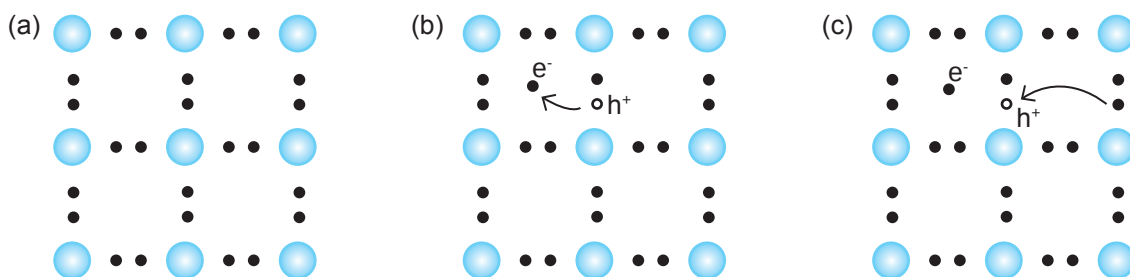
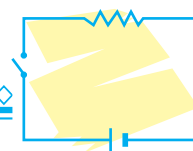


Fig. 2.26. a) Esquema plano de la estructura de una porción de cristal de silicio. Si la temperatura es muy baja, apenas se forman electrones libres. (b) Con la elevación de temperatura los enlaces se rompen, formándose electrones libres y huecos. (c) Los electrones que forman los enlaces no permanecen fijos, sino que se desplazan por la red de enlaces, sin embargo, si la temperatura es muy baja permanecen bien ligados, no constituyen electrones libres.

Con la elevación de temperatura, la energía cinética de los electrones de valencia aumenta y los enlaces pueden romperse (Fig. 2.26b). **A mayor temperatura, mayor número de electrones que dejan los enlaces y se convierten en electrones libres**. Por ejemplo, al calentar una porción de silicio desde la temperatura ambiente hasta unos 400 °C, el número de electrones libres crece de $10^{11}/\text{cm}^3$ a $10^{18}/\text{cm}^3$, es decir, unos diez millones de veces, por lo que su resistencia eléctrica disminuye enormemente.



Los electrones que dejan los enlaces originan defecto de ellos en la red de enlaces. Lo usual es decir que se producen **vacancias**, o **huecos** (Fig. 2.26b). Puesto que los huecos constituyen defecto de electrones, ellos pueden ser considerados con carga positiva. Por otra parte, los electrones que intervienen en los enlaces, al desplazarse por la red de enlaces, van pasando por esos huecos (Fig. 2.26c). Nota que el desplazamiento de un electrón de cierto enlace a un hueco, implica el desplazamiento del hueco en sentido opuesto. De modo que la posición de los huecos en la red no es fija. Como los electrones que se mueven por la red de enlaces lo hacen desordenadamente, los huecos también.

Pero la resistencia de un semiconductor puede disminuir no solo con el aumento de temperatura, sino también de la iluminación. Este efecto no está relacionado con el calentamiento del semiconductor al incidir sobre él la luz, pues se produce aún cuando la temperatura se mantenga constante. Su origen igualmente está en la ruptura de los enlaces de los átomos, pero en este caso debido a la energía comunicada a los electrones por los corpúsculos luminosos, denominados **fotones**. Dicho efecto se llama **efecto fotoeléctrico**.

En el semiconductor se tienen así, ya sean generados por el aumento de temperatura o de la iluminación, electrones libres con carga negativa y huecos con carga positiva, ambos moviéndose desordenadamente. Al aplicar una diferencia de potencial al semiconductor, el campo eléctrico originado en su interior orienta el movimiento ellos, formándose **una corriente eléctrica de electrones libres y de huecos**. **El movimiento de los huecos es en sentido contrario al de los electrones**.

La fuerte dependencia de la resistencia eléctrica de los semiconductores con la temperatura se utiliza para detectar variaciones de ésta, o para medirla. Los dispositivos diseñados con este fin se denominan **termistores**, o **termorresistores**. Ellos constituyen uno de los dispositivos semiconductores más simples, se emplean en alarmas de fuego, control de temperatura a distancia, termómetros digitales.

Explica con tus propias palabras por qué disminuye la resistencia eléctrica de un semiconductor con el aumento de temperatura o de la iluminación.





Profundiza con ayuda de una enciclopedia, o de Internet, en las aplicaciones de los termistores y las fotorresistencias.



Los dispositivos que utilizan el efecto fotoeléctrico en los semiconductores se denominan **fotorresistores** o **fotorresistencias**. Se emplean en muy diversas ramas de la ciencia y la tecnología: como detectores de luz, por ejemplo, para activar o desactivar el sistema de alumbrado público; para evaluar la calidad de ciertas superficies, etc.

Pese a que en los semiconductores el número de portadores de carga crece con la temperatura y la iluminación, en condiciones normales es todavía demasiado pequeño como para que sean buenos conductores. Por ejemplo, vimos que a temperatura ambiente en el silicio hay $10^{11}/\text{cm}^3$ electrones libres, pero este número es insignificante si se compara con el correspondiente al cobre: $8.4 \times 10^{22} / \text{cm}^3$.

Sin embargo, **introduciendo determinado tipo de impurezas en el semiconductor, es posible elevar enormemente el número de electrones libres o el número de huecos en él**. Consideremos un cristal de silicio en el que se introducen, por ejemplo, átomos de fósforo (P). Los átomos de este elemento tienen 5 electrones de valencia, 4 de ellos participan en enlaces covalentes con los de silicio y el quinto, se convierte en un electrón libre (Fig. 2.27a). Cada átomo de fósforo aporta un electrón libre, por lo que con una pequeñísima proporción de él se logra aumentar mucho la cantidad de electrones libres. Tales impurezas, capaces de donar electrones, se denominan **impurezas donoras**.

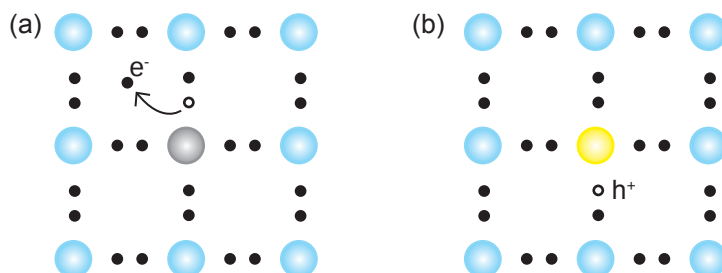
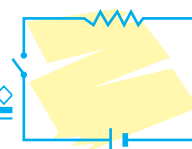


Fig. 2.27. Impurezas introducidas en un cristal de silicio: (a) cada átomo de fósforo adiciona un electrón libre. (b) cada átomo de aluminio, da lugar a un hueco.



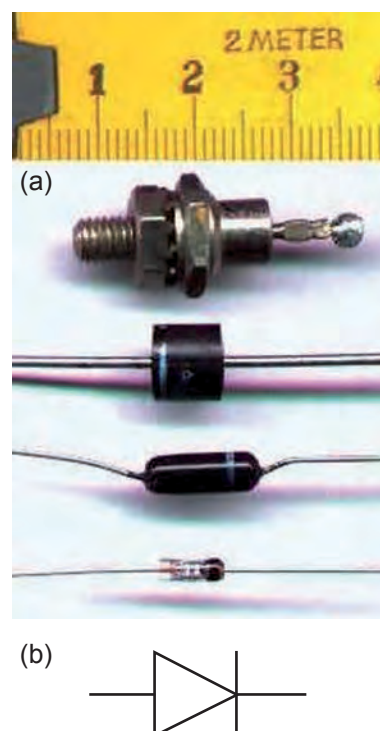
Si lo que se introduce en el cristal de silicio son átomos de un elemento con 3 electrones de valencia, como por ejemplo aluminio (Al), entonces al enlazarse con 4 átomos de silicio queda una vacancia, es decir un hueco (Fig. 2.27b). El número de huecos que surge es igual al de átomos introducidos. Estas impurezas, que originan huecos disponibles para aceptar electrones ligados durante el desplazamiento por la red de enlaces, se denominan **impurezas aceptoras**.

¿Por qué el semiconductor en que los electrones libres son muchísimos más que los huecos se denominará n y aquel en que los huecos son los mayoritarios se llamará p ?

Utilizando el tipo de impureza adecuado se preparan semiconductores en que los portadores fundamentales de carga son electrones, los cuales se denominan **semiconductores tipo n** , y semiconductores en que los portadores fundamentales son huecos, llamados **semiconductores tipo p** . En un semiconductor tipo n la corriente eléctrica se debe casi por completo a los electrones, pues la cantidad de huecos es muy pequeña comparada con la de electrones libres. En cambio, en uno tipo p sucede a la inversa, la corriente se debe básicamente a los huecos, ya que los electrones libres están en minoría.



El contacto entre un semiconductor tipo n y otro tipo p es el fundamento del **diodo semiconductor** (Fig. 2.28). Su funcionamiento, muy simplificado, consiste en lo siguiente: Si se conecta el dispositivo formado por los dos tipos de semiconductores a una fuente de corriente continua con la polaridad que se muestra en el diagrama de la figura 2.29a, denominada **polarización inversa**, aún cuando se eleve el voltaje la intensidad de corriente es extremadamente pequeña, del orden de los microamperes. Ello se debe a que con esa polaridad, los impulsados a moverse a través de la unión de los dos semiconductores y formar así la corriente eléctrica son, en el semiconductor tipo p , los electrones y en el tipo n , los huecos, pero en ambos casos su cantidad es demasiado pequeña como para originar una corriente apreciable. Sin embargo, si la polaridad del dispositivo es la mostrada en la figura 2.29b, denominada **polarización directa**, entonces los impulsados a atravesar la unión son los electrones del semiconductor tipo n , que



2.28. (a) Algunos tipos de diodos semiconductores. (b) Símbolo utilizado para un diodo común.



están en abundancia, y los huecos del semiconductor tipo p , que igualmente son abundantes, por lo que la intensidad de corriente puede llegar a ser notable. En la figura 2.30 se muestra la forma que tiene el gráfico de la característica voltampérica de un diodo común.

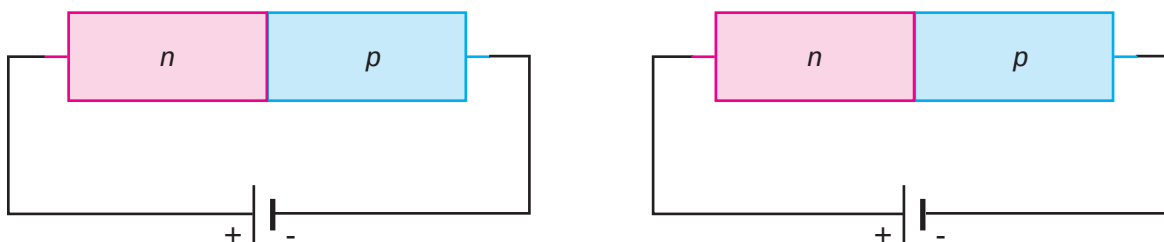


Fig. 2.29. Dispositivo formado por dos semiconductores, uno n y otro p en contacto. En (a) el dispositivo apenas conduce, pues los portadores de carga impulsados por la fuente son pocos. En (b) el dispositivo conduce, porque los portadores impulsados por la fuente están en abundancia.

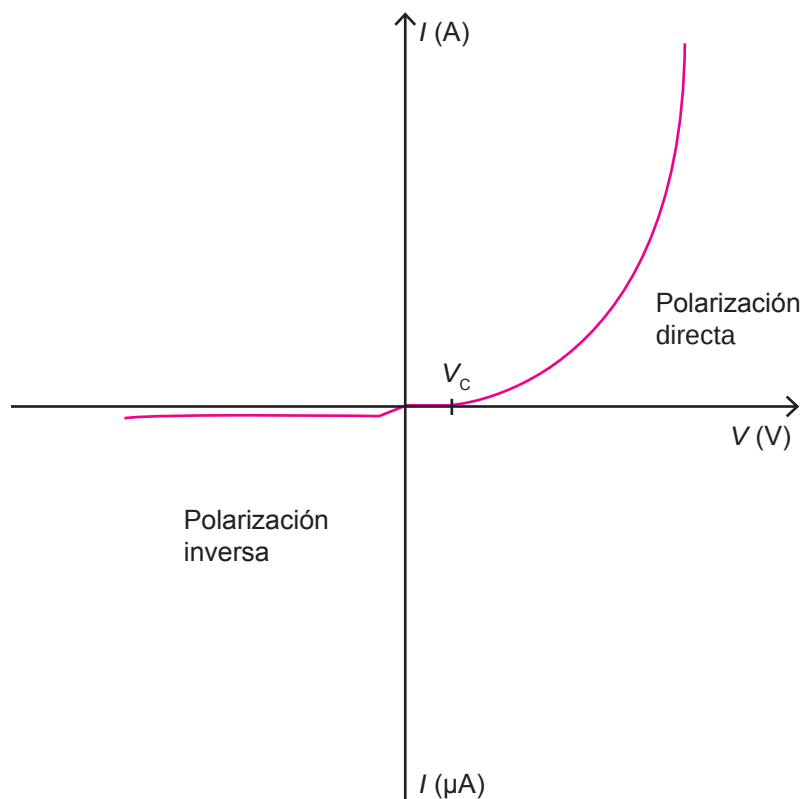


Fig. 2.30. Gráfico de la característica voltampérica de un diodo común. Cuando la polarización es inversa el diodo apenas conduce y cuando es directa, la intensidad de corriente aumenta rápidamente a partir de cierto valor de voltaje, denominado voltaje de corte (V_c).

Cabe señalar que aún cuando la polarización del dispositivo sea directa (Fig. 2.29b), si el voltaje aplicado es bajo la intensidad de corriente es muy pequeña, del orden de los nanoamperes, como muestra el gráfico de la figura 2.30. Esto se debe a lo que ocurre en el contacto entre las porciones n y p cuando se elabora el dispositivo. Durante la formación del contacto, del semiconductor tipo n penetra cierta cantidad de electrones en el tipo p y, a su vez, de este penetra cierta cantidad de huecos en el tipo n . Ocurre una **difusión**, como al poner en contacto dos gases diferentes, en que las moléculas de uno se mezclan con las del otro (aunque en la figura se ha representado muy ampliada, la zona de interpenetración es sumamente estrecha, del orden de 10^{-3} mm). Si tienes en cuenta que **antes del contacto los semiconductores eran neutros**, entonces comprenderás que la zona del semiconductor tipo p próxima a la unión queda cargada negativamente y la del semiconductor tipo n , positivamente (Fig. 2.31). Esto origina un campo eléctrico y una diferencia de potencial que en un diodo habitual de silicio es alrededor de 0.6 V y en uno de germanio 0.2 V. Nota que la intensidad de ese campo eléctrico tiene sentido opuesto a la del campo producido por la fuente cuando la polarización es directa. Por eso, la intensidad de corriente comienza a aumentar rápidamente con el voltaje aplicado (aproximadamente en forma exponencial), sólo cuando este supera los valores mencionados, según se trate de un diodo de silicio o de germanio. Tales valores se denominan **voltajes de corte**.

Esta propiedad de los diodos de conducir cuando su polaridad es directa y no conducir cuando es inversa, permite utilizarlos para convertir corriente alterna en directa, cosa necesaria cuando se conectan ciertos equipos a un enchufe habitual. Los dispositivos o circuitos que realizan esta función se denominan **rectificadores**.

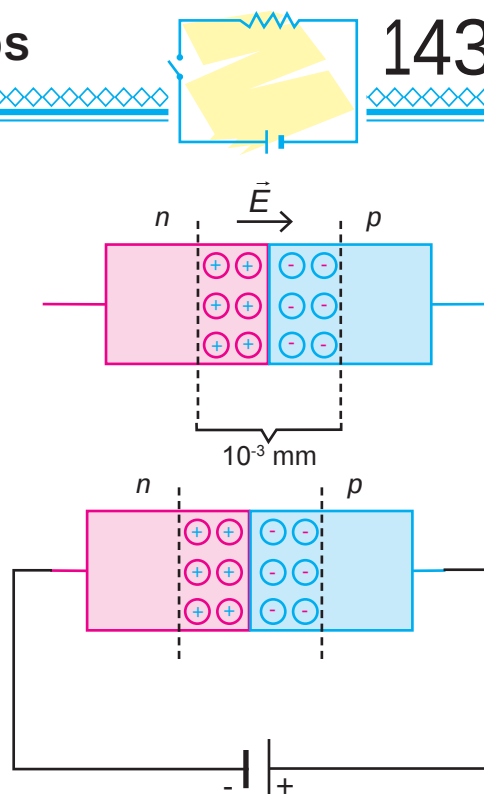
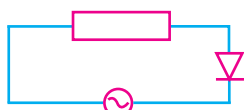


Fig. 2.31. Durante la formación del contacto entre dos semiconductores, uno tipo n y otro tipo p , ocurre una difusión de electrones y huecos. La zona de la parte p próxima a la unión queda cargada negativamente y la de la parte n , positivamente. Esto origina un campo que es opuesto al producido por la fuente cuando la polarización del diodo es directa.

¿Te atreves a dibujar la forma que tendría el gráfico de $I(V)$ en el circuito del esquema?



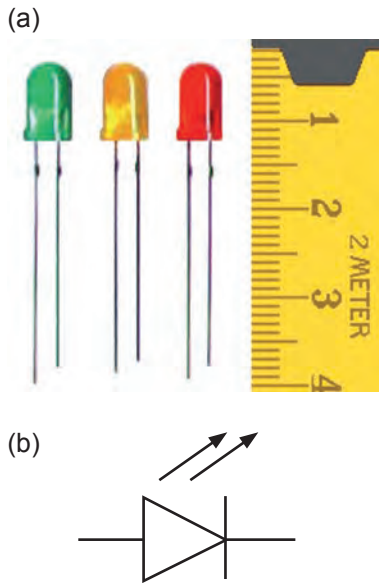


Fig. 2.32. (a) Algunos tipos de diodos emisores de luz (LED)
(b) Símbolo utilizado para el LED.

Los diodos tienen otras muchas aplicaciones en los circuitos electrónicos y se ha diseñado una gran variedad de ellos. Uno de los tipos más conocido es el LED (**light emitting diode**, es decir, diodo emisor de luz) (Fig. 2.32). Hemos visto que cuando se comunica energía térmica o luminosa a un semiconductor, pueden romperse los enlaces entre sus átomos, formándose electrones libres y huecos. En el LED ocurre el proceso contrario, al combinarse electrones libres y huecos el dispositivo entrega energía en forma de radiación. En los diodos comunes también tiene lugar esta combinación de electrones y huecos, pero la mayor parte de la energía liberada se transforma en energía térmica. La transformación de energía liberada durante la combinación de electrones y huecos en energía térmica o en radiación luminosa, depende principalmente del material semiconductor utilizado. Por otra parte, los LEDs tienen una disposición constructiva especial, a fin de evitar que la radiación emitida sea absorbida nuevamente por el material circundante.

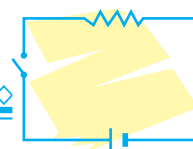
Como los diodos comunes, para que el LED conduzca es necesario que su polaridad sea directa. Habitualmente su terminal más largo indica que ese debe ser el positivo (Fig. 2.32). La intensidad de corriente de trabajo de los LEDs comunes está entre 10 mA y 20 mA. El **voltaje de corte**, es decir, a partir del cual la intensidad de corriente es considerable y comienzan a emitir apreciablemente, varía entre 1.8 V y 3.5 V, según el color. El menor valor corresponde al rojo y el mayor al azul. También hay LEDs que emiten radiación infrarroja y ultravioleta.

Con ayuda de Internet profundiza en los tipos y aplicaciones de los diodos.



La unión de dos materiales semiconductores de diferente tipo constituye el fundamento no solo de los diodos, sino también de otros dispositivos electrónicos y, en particular, del **transistor**, cuya invención significó una gran revolución en la electrónica. Los transistores son parte esencial de los circuitos de radios, televisores, computadoras, etc.

Indaga, en una enciclopedia o en Internet, acerca de los transistores.



2.3. Funcionamiento de circuitos eléctricos simples

2.3.1. Conexiones en serie y paralelo

Dos de las formas más elementales de conectar los dispositivos en un circuito son las mostradas en la figura 2.33.

En el primer tipo de conexión (Fig. 2.33a), denominado **en serie**, la **intensidad de corriente es la misma en todos los dispositivos** y la **diferencia de potencial en los extremos del circuito es igual a la suma de las diferencias de potencial entre ellos**.

En el segundo tipo de conexión (Fig. 2.33b), llamado **en paralelo**, la **diferencia de potencial es la misma en los terminales de todos los dispositivos** y la **intensidad de corriente en la parte no ramificada del circuito es igual a la suma de las intensidades en cada uno de ellos**.

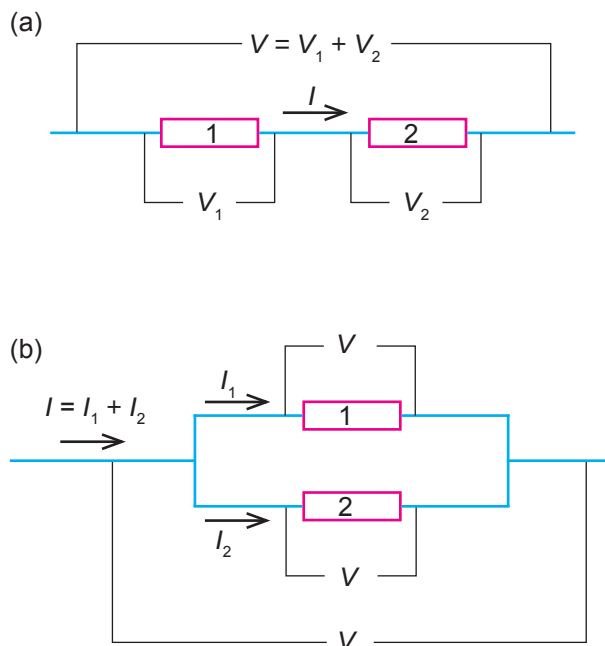


Fig. 2.33. Dos de las formas más elementales de conectar los dispositivos en un circuito: (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo.

Cuando los receptores están **en serie**, si se desconecta alguno de ellos se interrumpe el paso de la corriente en todos los demás. Cuando están **en paralelo**, si se desconecta alguno, por los otros puede continuar fluyendo la corriente.

En la conexión en paralelo, ¿tienen realmente los receptores que situarse uno paralelamente al otro?

El circuito eléctrico de las viviendas y otras instalaciones se dispone de tal modo que cuando se conecten varios receptores, queden en paralelo. ¿Qué ventajas representa este tipo de conexión respecto a la conexión en serie?

Menciona y argumenta qué tipo de conexión es la utilizada en los siguientes casos: a) en una “extensión” diseñada para conectar varios equipos, b) entre una lámpara y su interruptor, c) entre las pilas en una linterna, d) entre los bombillos de una guirnalda de las utilizadas en Navidad. Traza esquemas de los circuitos en cada caso.





Imaginemos que en la figura 2.33 los dispositivos conectados en serie (Fig. 2.33a) o en paralelo (Fig. 2.33b) son dos receptores de resistencias R_1 y R_2 . Los receptores pueden ser, por ejemplo, bombillos, calefactores u hornillas eléctricas, motores eléctricos. ¿Cuál será la resistencia total de las porciones de circuito en cada caso?

Para la **conexión en serie** (Fig. 2.33a) se tiene:

$$V = V_1 + V_2$$

Dividiendo esta ecuación entre la intensidad de corriente I en el circuito se tiene:

$$\frac{V}{I} = \frac{V_1}{I} + \frac{V_2}{I}$$

Pero, como recordarás, la definición de resistencia eléctrica es $R = V/I$, por lo que la **resistencia total o equivalente de una porción de circuito con dos receptores conectados en serie es igual a la suma de sus resistencias**:

$$R = R_1 + R_2$$

En el caso de la **conexión en paralelo** (Fig. 2.33b):

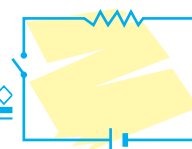
$$I = I_1 + I_2$$

El voltaje V entre los extremos de la porción de circuito constituida por los dos receptores es el mismo que entre los terminales de cada uno de ellos. Dividiendo la ecuación anterior entre dicho voltaje se tiene:

$$\frac{I}{V} = \frac{I_1}{V} + \frac{I_2}{V}$$

Y como $R = V/I$, entonces $1/R = I/V$, por lo que la ecuación anterior puede escribirse:

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



De aquí que el **inverso de la resistencia total o equivalente de una porción de circuito con dos receptores conectados en paralelo es igual a la suma de los inversos de sus resistencias**:

De la ecuación anterior puede hallarse R :

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

Los amperímetros se conectan en serie en la parte del circuito cuya intensidad de corriente se desea medir (Fig. 2.34a). Tienen una resistencia eléctrica muy pequeña, pues de lo contrario, al conectarlos modificarían apreciablemente la corriente que se desea medir. Es necesario tener presente siempre esa baja resistencia que poseen y no intentar, por ejemplo, medir la intensidad de corriente en una batería o en un enchufe conectando el amperímetro directamente a ellos. Esto provocaría un **cortocircuito**. Al ser muy pequeña la resistencia, según la ecuación $I = V/R$, la intensidad sería muy elevada, lo que echaría a perder el amperímetro. **Los voltímetros se conectan en paralelo** a la porción de circuito cuya diferencia de potencial se pretende medir (Fig. 2.34). Para que no produzcan alteraciones significativas en la corriente del circuito, y por tanto tampoco en el voltaje que se pretende medir, se construyen con una resistencia elevada. Esta debe ser mucho mayor que la resistencia de la porción de circuito a la cual se conectan. El voltímetro sí puede conectarse directamente a una batería o a un enchufe sin riesgo de que se eche a perder, solo hay que tener cuidado que esté previsto para medir el voltaje dado.

Hasta ahora no hemos tenido en cuenta la resistencia de las fuentes de fem, sin embargo, como dijimos en el apartado 2.1.4.4, en el interior de ellas las partículas cargadas se desplazan contra la resistencia que les presentan los átomos o moléculas entre los que se mueven. La resistencia eléctrica de las fuentes comúnmente se denomina **resistencia interna** y se designa por la letra r , para diferenciarla de la resistencia externa R del circuito. En las baterías y pilas electroquímicas la resistencia interna es

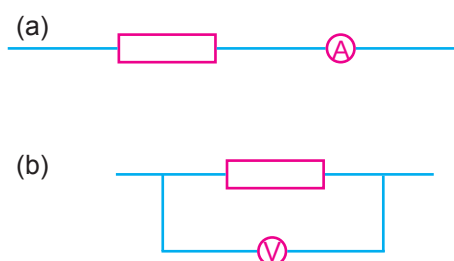


Fig. 2.34. (a) Los amperímetros se conectan en serie con la parte del circuito cuya intensidad de corriente se desea medir. (b) Los voltímetros se conectan en paralelo.

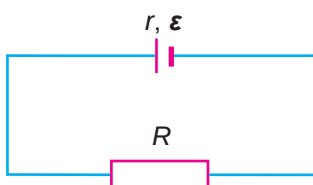


Fig. 2.35. Al conectar una fuente y un receptor, quedan en serie y la resistencia total del circuito es la suma de la resistencia de ambos: $r + R$.

la del electrolito y los electrodos, y en los generadores electromagnéticos, la del enrollado de sus bobinas.

Cuando una fuente se conecta a un circuito (Fig. 2.35), queda en serie con él, por lo que la resistencia total del circuito es la suma de la resistencia de la fuente y la resistencia externa: $r + R$. La resistencia externa R puede deberse a un solo dispositivo, pero también a un conjunto de ellos. Si la fuente es una pila, o una batería, y es nueva, o no se ha usado mucho, su resistencia interna es muy pequeña comparada con la externa y puede despreciarse. Sin embargo, con el uso aumenta y es necesario tomarla en cuenta, pues afecta a la intensidad de corriente.

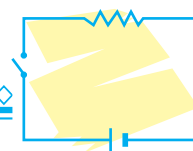
Como ya sabes, la fem expresa la energía (interna, luminosa, mecánica...) que se transforma por unidad de carga acumulada en los terminales de la fuente. Cuando por el circuito pasa corriente, una parte de esa energía pasa a energía potencial eléctrica en los terminales de la fuente, originando la diferencia de potencial entre ellos, pero otra parte se transforma en energía térmica en el interior de la fuente. Como resultado de esto, la energía potencial por unidad de carga originada por la acumulación de carga en los terminales de la fuente, es decir, la diferencia de potencial entre dichos terminales, $V = IR$, es menor que la fem:

$$IR = \varepsilon - Ir$$

El producto Ir representa la energía por unidad de carga que no se transforma en energía eléctrica, sino en térmica, debido a la resistencia que presenta la fuente al paso de la corriente. La ecuación anterior puede escribirse:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

El producto de la intensidad de corriente por la resistencia de una parte del circuito, con frecuencia se denomina **caída de voltaje**. Por eso, según la ecuación anterior, **la fem es igual a la suma de las caídas de voltaje en la parte externa del circuito y en el interior de la fuente.**



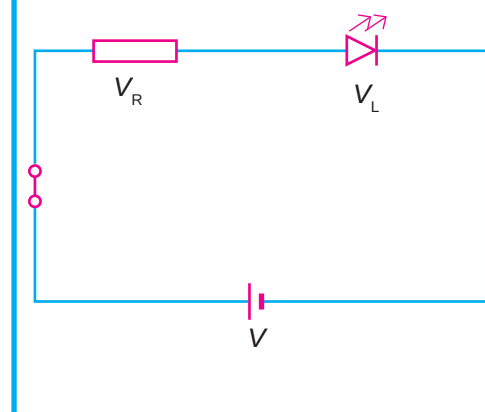
Si escribimos la ecuación en la forma $\varepsilon = I(R + r)$, se hace evidente porqué al conectar solo un voltímetro a los terminales de la fuente este mide la fem ε : como el voltímetro posee una resistencia muy elevada, $r \ll R$ y, por tanto, $\varepsilon \approx IR$. Es decir, la fem es aproximadamente igual a la diferencia de potencial en el voltímetro. Sin embargo, si la fuente está conectada a algún receptor de pequeña resistencia eléctrica, entonces su resistencia interna no puede despreciarse y en este caso el voltímetro indicará el valor del producto IR , que es menor que la fem de la fuente.

Despejando I la ecuación también puede escribirse:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R}$$

Esta expresión a veces se denomina **ley de Ohm para el circuito completo** (incluye la parte externa del circuito y la interna de la fuente). Si $r \ll R$, entonces en lugar de $r + R$ puede simplemente escribirse R y en lugar de ε , V , con lo cual se obtiene como caso particular la ecuación $I = V/R$, que es la forma común de la ley de Ohm.

Ejemplo 2.8. Se sabe que cuando el voltaje aplicado a un LED rojo es 1.8 V su luminosidad es baja y cuando es de 2.2 V alta. En el primer caso la intensidad de corriente es de unos 10 mA y en el segundo alrededor de 20 mA. Si el LED se va conectar a una fuente cuya fem es 5.0 V, ¿qué resistencia debe colocarse en serie con él para tener: a) 10 mA y, por tanto, baja luminosidad, b) 20 mA y por tanto, alta luminosidad. Desprecia la resistencia interna de la fuente.



En la figura se ha representado el diagrama del circuito. Puesto que la resistencia interna de la fuente se desprecia, el voltaje entre los extremos del conjunto coincide con su fem, es decir, es 5.0 V. Por otra parte, dicho voltaje es igual a la suma de los voltajes en el LED y en el resistor:

$$V = V_L + V_R$$

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



a) Sustituyendo ahora en la ecuación anterior los datos para baja luminosidad:

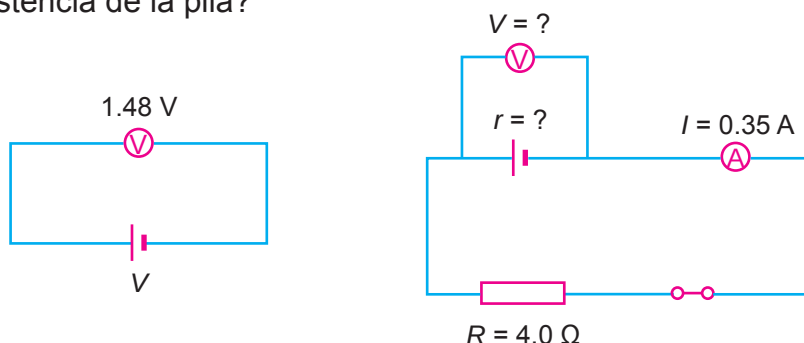
$$R = \frac{V - V_L}{I} = \frac{5 \text{ V} - 1.8 \text{ V}}{10 \times 10^{-3} \text{ A}} = 320 \, \Omega$$

b) En el caso de alta luminosidad:

$$R = \frac{V - V_L}{I} = \frac{5 \text{ V} - 2.2 \text{ V}}{20 \times 10^{-3} \text{ A}} = 140 \, \Omega$$

Ejemplo 2.9. Mediante un voltímetro se encontró que el voltaje entre los bornes de una pila es 1.48 V. Después se conectó en serie con ella un resistor de 4.0 Ω y un amperímetro, el cual indicó 0.35 A. a) Dibuja un esquema de los circuitos. b) ¿Cuál es la resistencia interna de la pila? c) ¿Qué voltaje indica el voltímetro cuando la pila está conectada al resistor y al amperímetro? d) ¿Cuál es la caída de voltaje debida a la resistencia de la pila?

(a)



b) Ya sabes que al conectar la pila como en el primer diagrama, el voltímetro indica su fem ε . La intensidad de corriente en el circuito representado por el segundo diagrama es $I = \varepsilon / (r + R)$. En esta ecuación R representa la resistencia externa total, que en este caso está formada por la suma de las resistencias del resistor y del amperímetro. Sin embargo, supondremos que la de este último es pequeña en comparación con la del resistor y no la tendremos en cuenta. De modo que ε , R e I son conocidas y el valor de r es el que debemos hallar.

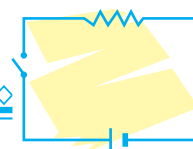
Resolviendo la ecuación para r :

$$(r + R)I = \varepsilon$$

$$r + R = \frac{\varepsilon}{I}$$

De donde:

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - R = \frac{1.48 \text{ V}}{0.35 \text{ A}} - 4.0 \, \Omega = 0.23 \, \Omega$$



c) En el circuito del segundo diagrama, el voltímetro indicará la suma de las caídas de voltaje en el resistor y en el amperímetro conectado en serie con él, pero hemos supuesto que la resistencia del amperímetro es despreciable, por lo que no la tenemos en cuenta. De modo que la indicación del voltímetro vendrá dada por la caída de potencial en el receptor:

$$V_v = RI = (4.0 \, \Omega)(0.35 \, A) = 1.4 \, V$$

Nota que el valor obtenido es menor que la fem. Ello se debe a que en el interior de la pila hay cierta caída de voltaje debida a su resistencia interna.

d) la caída de voltaje en el interior de la pila es:

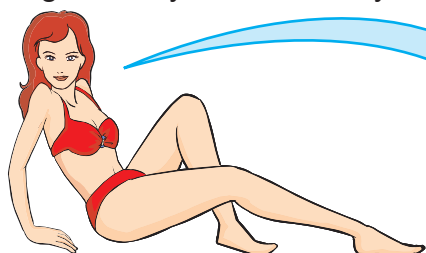
$$V_r = rI = (0.229 \, \Omega)(0.35 \, A) = 0.080 \, V$$

Esta caída de voltaje representa la energía por unidad de carga que no se transforma en energía eléctrica, sino en térmica, originando una elevación de temperatura de la pila.

2.3.2. Dispositivos de control

Durante la utilización de la energía eléctrica es importante no solo conectar adecuadamente los dispositivos, sino también utilizar ciertos **dispositivos de control**. Entre los más simples y comunes están, además de los **interruptores**, los **fusibles**, los **potenciómetros** y **reóstatos**, y los **termostatos**.

Los **fusibles** (Fig. 2.36) aseguran que la intensidad de corriente no sobrepase determinado valor. Los más comunes constan de un conductor, frecuentemente de plomo y con forma de filamento o lámina, por el cual fluye la corriente. Si la intensidad de ésta se eleva excesivamente, entonces el conductor al calentarse se funde, interrumpiéndose la corriente. Para resguardarse de intensidades de corriente mayores que las aceptables, en la actualidad se emplean, junto a los tradicionales fusibles, “breakers”, interruptores magnéticos y electrónicos y otros dispositivos.



¿Cómo debe ir conectado el fusible que protege a cierto equipo, en serie o en paralelo con él? Argumenta.

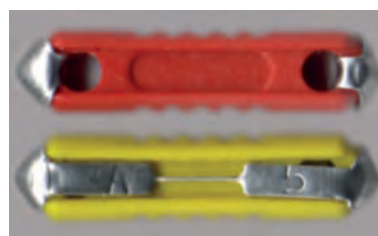
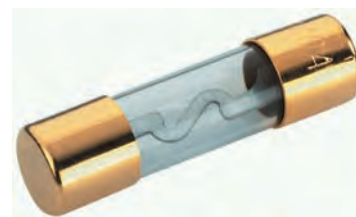


Fig. 2.36. fusibles comunes.



Profundiza en una enciclopedia, o Internet, acerca de los fusibles.



En los últimos años se han diseñado “fusibles” especiales a fin de proteger a las personas de descargas eléctricas producidas por corrientes de fuga en ciertos equipos, en particular cuando son utilizados en lugares húmedos. Tales dispositivos se colocan en los enchufes de cocinas, baños y otras áreas que pueden resultar especialmente peligrosas. Ellos detectan un desbalance entre la intensidad de corriente en el “vivo” y en el “neutro” de la red. Puesto que este desbalance puede deberse a una fuga de corriente a través de la persona, cuando sobrepasa los 5 mA, el dispositivo interrumpe la corriente.

Los **potenciómetros** son resistores, generalmente constituidos por un conductor de gran resistividad eléctrica ρ , con tres terminales (Fig. 2.37), dos en los extremos y uno intermedio, que puede variar su contacto a través del resistor mediante rotación o deslizamiento en línea recta. Se emplean para aplicar a un circuito una parte de cierto voltaje. En la figura 2.38 se muestra un esquema que permite comprender esta función del potenciómetro. Observa que si el contacto deslizante, representado en el diagrama por la saeta, se desliza hasta el extremo izquierdo del resistor, entonces el voltaje en el bombillo será nulo. Por el contrario, si el contacto deslizante se moviera hasta al extremo derecho, el voltaje en sus terminales sería 12 V. Si el contacto deslizante está en un lugar intermedio, “divide” el voltaje de 12 V en dos partes, una corresponde a su parte izquierda y otra a su parte derecha, por eso cuando el potenciómetro se conecta como en el diagrama de la figura, se dice que actúa como **divisor de voltaje**.

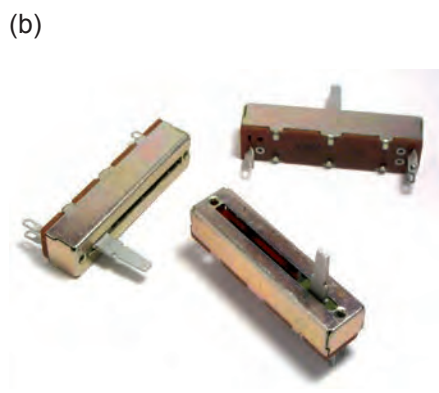
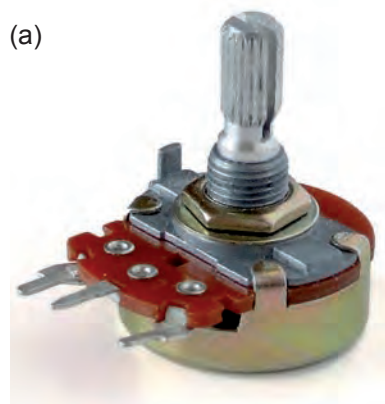


Fig. 2.37. Los potenciómetros son resistores con tres terminales, uno de ellos intermedio que puede variar su contacto con el resistor, mediante rotación (a) o desplazamiento en línea recta (b). Se utilizan, por ejemplo, para controlar volumen y otras características del sonido en equipos de audio.

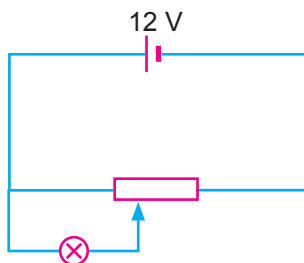


Fig. 2.38. El potenciómetro se utiliza para aplicar a un dispositivo o circuito una parte de cierto voltaje, es decir, como divisor de voltaje.

Explica con tus propias palabras por qué cuando el potenciómetro se conecta como en el diagrama de la figura 2.38 se dice que actúa como divisor de voltaje.



Si en un potenciómetro solo se conectan el terminal del contacto deslizante y el de uno de los extremos, entonces actúa como resistor variable o **reóstato**.

En el ejemplo 2.8 vimos que si se utiliza una fuente de 5 V para alimentar un LED, éste da baja luminosidad cuando se conecta en serie con un resistor de unos $320\ \Omega$ y alta si el resistor es de alrededor de $140\ \Omega$. Sin embargo, la intensidad de corriente que pasa por el LED y, por tanto, su luminosidad, puede ser ajustada al valor deseado utilizando un potenciómetro en calidad de reóstato. En la figura 2.39 se muestra el esquema del circuito.

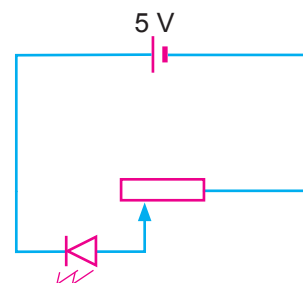
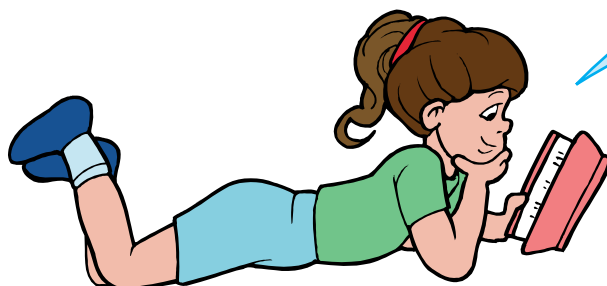


Fig. 2.39. Potenciómetro utilizado como reóstato para regular la intensidad de corriente en un LED y, por tanto, su luminosidad.

Los **termostatos**, comunes en planchas, refrigeradores y acondicionadores de aire, posibilitan un nivel superior de control en los circuitos: la **regulación automática**. La función de los termostatos es mantener la temperatura cercana a cierto valor. Por ejemplo, en una plancha, cuando la temperatura alcanza determinado valor, el termostato desconecta la “entrada” de energía eléctrica y luego, al descender la temperatura hasta cierto nivel, la conecta nuevamente.



Indaga en una enciclopedia, o en Internet, acerca del funcionamiento de los termostatos.

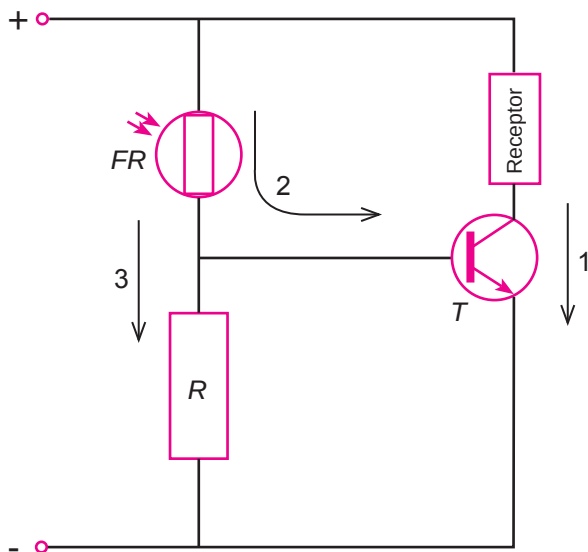


Fig. 2.40. El circuito representado puede considerarse formado por tres circuitos simples acoplados entre sí. Los cambios en uno afectan la intensidad de corriente en los otros.

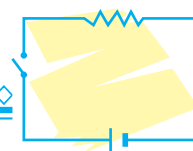
Imagina que en el circuito de la figura 2.40 el receptor es un pequeño bombillo, ¿dónde habría que colocar R y FR para que al disminuir la intensidad de luz que incide sobre el fotorresistor el bombillo se encienda?



2.3.3. Acoplamiento de circuitos eléctricos simples

En la figura 2.40 se muestra el esquema de un circuito algo más complejo que los examinados hasta ahora. Consta de una **fuentes**, algún **receptor**, **conductores de conexión** y un **dispositivo o sistema de control** formado por un resistor (R), un fotorresistor (FR) y un transistor (T). En este circuito los componentes no están conectados en serie ni en paralelo, está formado por tres circuitos más simples **acoplados entre sí**. Los cambios en uno de ellos afectan a los otros. Los transistores tienen la peculiaridad de que posibilitan regular la corriente en uno de los circuitos (1) a partir de la diferencia de potencial entre su base (en la figura su terminal intermedio) y el emisor (en la figura su terminal inferior). En particular, por el circuito 1 puede fluir una corriente apreciable solo si dicha diferencia de potencial es superior al voltaje de corte (0.6 V).

Observa que el fotorresistor y el resistor forman un divisor de voltaje. Si la resistencia del resistor es pequeña comparada con la del fotorresistor, entonces la diferencia de potencial en él, y por tanto entre la base y el emisor del transistor también es pequeña, menor que el voltaje de corte, y el transistor no deja pasar corriente por el circuito 1. Sin embargo, si la intensidad de luz que incide sobre el fotorresistor aumenta, su resistencia disminuye y la caída de voltaje en el resistor se hace mayor, con lo cual el transistor pudiera dejar pasar corriente por el circuito 1. El transistor funciona así como un interruptor. En conclusión, un aumento de la intensidad de luz en el fotorresistor, puede hacer funcionar el receptor (timbre, motor, etc.). En lugar del fotorresistor es posible utilizar otro dispositivo cuya resistencia varíe al aumentar o disminuir otra magnitud, digamos una termorresistencia, la cual disminuye su resistencia con el aumento de temperatura. De este modo un circuito como el de la figura 2.40 puede detectar cierto nivel de iluminación, temperatura, etc.



A lo largo de este apartado hemos visto que los circuitos eléctricos pueden ser muy variados, tanto por sus componentes como por el modo en que estos se conectan entre sí. En particular, como fuentes se utilizan pilas, acumuladores, el enchufe de la red eléctrica, etc. La relación de receptores eléctricos es inmensa: lámparas, motores, televisores y muchos más. Los dispositivos y sistemas de control también son muy variados. Todos estos elementos se asocian en los circuitos de muy diferentes modos: en serie, en paralelo, o en formas mucho más complejas. Sin embargo, pese a esta diversidad de circuitos, entre ellos existe cierta unidad: el funcionamiento básico de todos ellos puede ser descrito utilizando los conceptos de fem, voltaje, intensidad de corriente y potencia.

2.3.4. Medición y ahorro de energía eléctrica

Para el uso racional de la energía eléctrica y su **ahorro**, resulta indispensable su **medición**, tanto durante el “consumo” como durante la “generación”.

En el curso de Mecánica te relacionaste con la unidad fundamental de energía, el **joule**. Sin embargo, al referirse a la cantidad de energía “consumida” o “generada” por receptores y fuentes conectados a la red habitual de electricidad, es usual emplear otra unidad con la que resulta más cómodo trabajar: el **watt.hora** (W.h). Esta unidad tiene la ventaja que permite relacionar fácilmente la cantidad de energía utilizada por el equipo o instalación, con su potencia y el tiempo de funcionamiento. Por ejemplo, la energía consumida al cabo de una hora por una lámpara de 20 W es, simplemente, $20 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 20 \text{ W.h}$, y la generada en un día por una planta de 100 MW, es $100 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 2\,400 \text{ MW.h}$.

¿Por qué será que en el texto, al referirse a la energía eléctrica consumida o generada se escribieron esas palabras entre comillas?

Un bombillo de 100 W permanece encendido todos los días durante 10 horas. ¿Qué cantidad de energía eléctrica, expresada kW, “consume” cada día?





Si la resistencia del aire fuese despreciable, ¿hasta qué altura se elevaría un cuerpo de 10 kg lanzado verticalmente hacia arriba con una energía de 1 W.h? ¿Y si fuese lanzado con la energía equivalente a la que consume un bombillo de 100 W en una hora?



¿Qué relación hay entre el **watt.hora** (W.h) y la unidad fundamental de energía, es decir, el **joule** (J)?

Puesto que $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, resulta que:

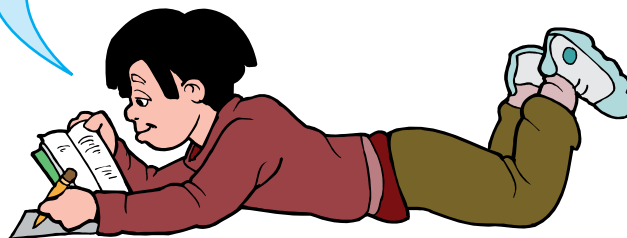
$$1 \text{ W.h} = 1 \text{ J/s} \times 3\,600 \text{ s} = 3\,600 \text{ J.}$$

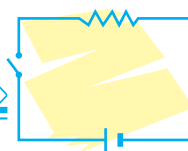
La Comisión Federal de Electricidad mide la energía consumida en las viviendas y otras instalaciones mediante un instrumento denominado **medidor de consumo eléctrico**, o **contador eléctrico**. Los hay electromecánicos y electrónicos. La idea básica del funcionamiento de los electromecánicos (Fig. 2.41), que siguen siendo los más comunes, consiste en lo siguiente. Constan de un disco metálico que gira con una rapidez proporcional a la intensidad de corriente que pasa por el instrumento, la que a su vez es proporcional a la potencia de los equipos que están conectados ($I = P/V$). En consecuencia, el número de vueltas realizado por el disco al cabo de cierto tiempo depende de la **potencia** total de los equipos en uso y del **tiempo de funcionamiento**. Pero estas magnitudes, potencia y tiempo, determinan, como sabes, la energía consumida. Por consiguiente, contando el número de vueltas que ha dado el disco del medidor, es posible conocer la energía consumida. Esto es precisamente lo que hace el medidor. El equivalente en kW.h del número de vueltas que ha dado el disco es leído en los pequeños relojes.



Fig. 2.41. Medidor de consumo eléctrico electromecánico.

Observa en el medidor eléctrico de tu casa cómo depende la rapidez con que gira su disco de la cantidad de equipos eléctricos que están conectados. Verifica si la instalación eléctrica de tu casa funciona correctamente: desconecta todos los equipos y mira si el disco gira.



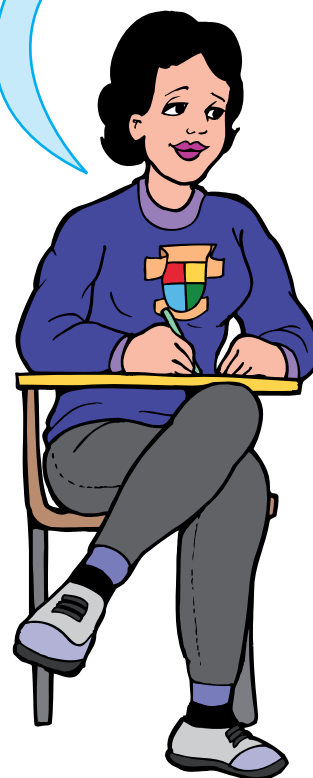


A finales del pasado siglo, la generación y consumo mundial de energía era unas 80 veces superior que en 1800, año en que se inventó la primera fuente de electricidad efectiva. Buena parte de ese crecimiento se ha debido a la energía eléctrica que se genera en termoeléctricas a partir de **combustibles fósiles**. El agotamiento de estos, como sabes, se prevé para un futuro no lejano, lo que ha traído consigo un encarecimiento de la producción de energía eléctrica en el mundo.

Lo anterior, unido a la contaminación del medio ambiente provocada por las termoeléctricas habituales, ha conducido a la urgente necesidad de **ahorrar** energía eléctrica, y a la búsqueda de fuentes que constituyan una alternativa a los combustibles fósiles.

¿Si cada kilowatt.hora (kW.h) vale \$ 0.95. ¿cuál será al cabo de un mes el costo debido a un bombillo de 100 W que permanece encendido 10 horas diarias?

Indaga en Internet qué proporción de la energía total que se consume en el planeta es eléctrica. ¿Cuáles son las fuentes principales de las que se obtiene en la actualidad?





2.4. Actividades de sistematización y consolidación

2.4.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

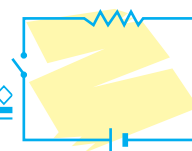
Ú T G O I R E P M A E G L J T A G F
L S G M V E U Q F T F F O U C N O E
X Í B Y C V L B Y F O Z X H I R N L
E C V Ó O Á H E E X T Í D N A E O B
L P A Ú N Á I U C M O I T É N T D I
E O I T D O Ó E C T R E V Ü I L O S
C C G H U D N Ó D E R Ú Q U Q A R U
T I R U C O M L C R E Ó C K U Z T F
R R Á E T I D T U W S R N B T I C Y
O T B C O D A P B B I S O E Q É E W
L C A O R M T K Í C S T I V Ü P L T
I É T D S O H D L L T Ú Á X Y Ú E T
S L E S R S Ñ E F H O Y D D Y F Á Q
I E R I Í Q F N S T R U J V L U C Ü
S I Í G C O R R I E N T E C G E O Á
N D A Y I U S Í K A D L É L W N Q B
Ú G H P D F E M É M R K Ú Á E T Ñ Ñ
G Q X O R T E M Í R E P M A F E Ú A

Alterna
Amperímetro
Amperio
Batería
Circuito
Conductor
Corriente
Dieléctrico
Diodo
Directa
Electrodo
Electrolisis
Electrón
Fem
Fotorresistor
Fuente
Fusible
Hueco
Interruptor
Ión

O A G Ñ É G R K B Z Q D T R P Í R Í
Í I R O T S I M R E T U O Ü R W E A
D D T L A T E M O R G T V O O R S J
Q J E L T F Ú T E F S Í T S T E I Y
A L I P O N Q Ó Y I J A Í A S S S N
H R C E É V S X S P T H Z N I I T A
R E E B C T Z N F S Ñ W D B S S E Á
N Í F C A A A Ü O K I Q K Q E T N F
N C Ó T E R Í M Q O Z H R M R I C Ó
É A O I T P R M R U K T U Ñ R V I E
Á Q Y L Í E T T P U T L Y K O I A J
X U D E T A E O J U T X E F M D J A
I J E T Ú M T H R Í T O M H R A K T
F Z L H Í E I C M I T I K É E D U L
B Ó T T N V H E Z Q F M A T T Á E O
R Ü L C P O T E N C I Ó M E T R O V
B O I T G R C T E Z Q H E F A A X G
V A B R O T C U D N O C I M E S W J

LED
Metal
Multímetro
Ohm
Pila
Potencia
Potenciómetro
Receptor
Reóstato
Resistencia
Resistividad
Semiconductor
Termistor
Termorresistor
Termostato
Transistor
Voltaje
Voltímetro
Voltio
Watt





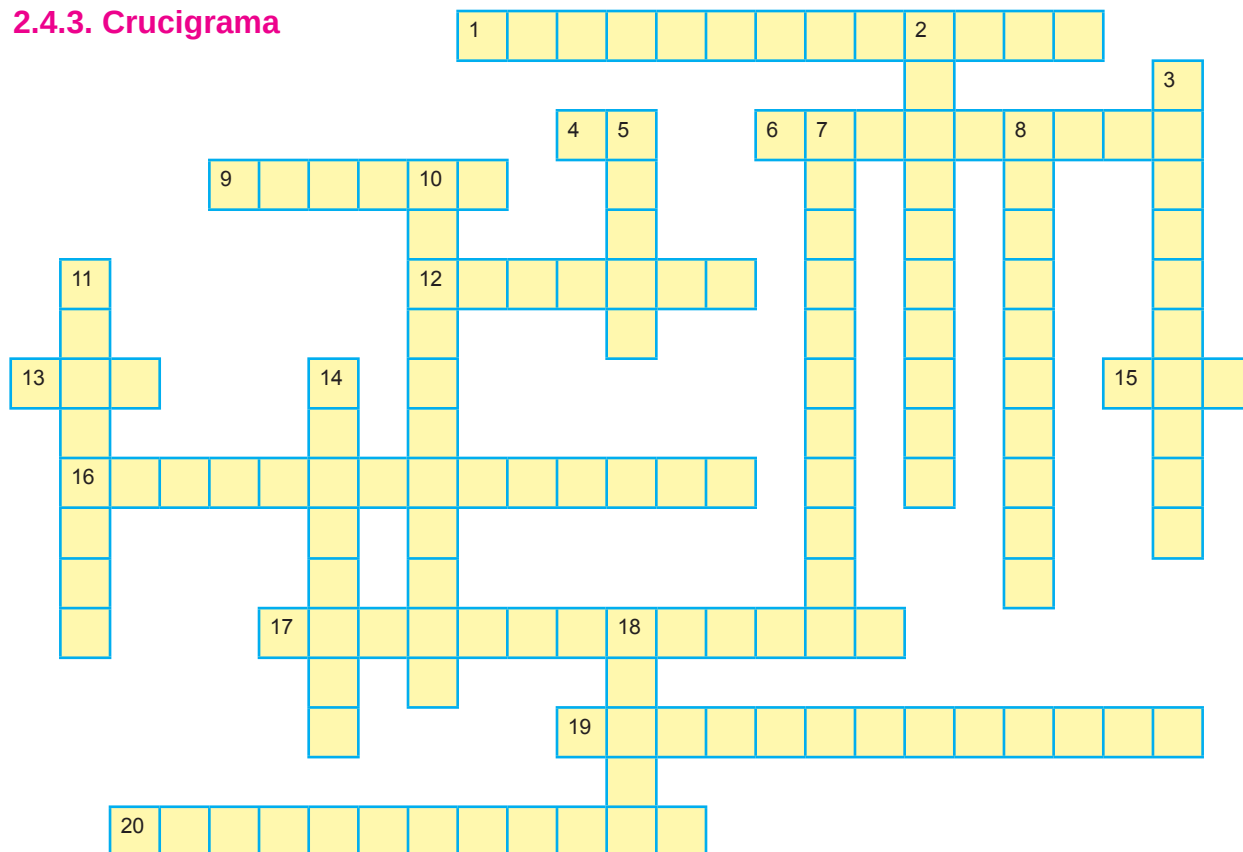
2.4.2. Conexión de conceptos e ideas

Relaciona las dos columnas escribiendo el número según corresponda.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. Movimiento de partículas cargadas en determinada dirección. | () Alessandro Volta |
| 2. Una de las condiciones que se requiere para que exista corriente eléctrica. | () Campo eléctrico |
| 3. Mecanismo basado en la electrización por frotamiento que permite acumular carga en un cuerpo. | () Característica volt-ampérica |
| 4. Científico que inventó el primer generador efectivo de electricidad. | () Corriente alterna |
| 5. Cambios provocados por la corriente eléctrica. | () Corriente directa |
| 6. Científico que descubrió el efecto magnético de la corriente eléctrica. | () Corriente eléctrica |
| 7. Corriente eléctrica cuyo sentido no varía. | () Descarga eléctrica |
| 8. Corriente eléctrica que varía su sentido periódicamente. | () Divisor de voltaje |
| 9. Rapidez con que fluye carga neta a través de la sección transversal de un conductor. | () Divisor de voltaje |
| 10. Rapidez con que se transforma algún tipo de energía en energía eléctrica, o esta en otros tipos de energía. | () Efecto fotoeléctrico |
| 11. Amplitud del voltaje alterno sinusoidal. | () Efectos de la corriente eléctrica |
| 12. Voltaje que mide un voltímetro en un enchufe habitual. | () Efectos de la corriente eléctrica |
| 13. Científico que encontró la relación de proporcionalidad directa entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial entre los extremos de un conductor metálico. | () Equivalente electroquímico |
| 14. Dependencia entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial para un dispositivo eléctrico. | () Georg S. Ohm |
| 15. Científico a quien se debe el descubrimiento de que la masa de sustancia obtenida en los electrodos durante una electrólisis es proporcional a la intensidad de corriente y al tiempo. | () Hans C. Oersted |
| 16. Cociente entre la masa y la carga eléctrica de un ión. | () Intensidad de corriente eléctrica |
| 17. Denominación que también recibe la corriente eléctrica en los gases. | () Máquina electrostática |
| 18. Fenómeno que consiste en la ruptura de los enlaces entre los átomos al incidir luz sobre un material semiconductor. | () Michael Faraday |
| 19. Diferencia de potencial en un diodo a partir de la cual la intensidad de corriente se hace apreciable. | () n |
| 20. Potenciómetro o resistores conectados para aplicar una parte de cierto voltaje a un circuito. | () p |
| 21. Tipo de semiconductor en que los portadores fundamentales de carga son electrones y los huecos están en minoría. | () Potencia eléctrica |
| 22. Tipo de semiconductor en que los portadores fundamentales de carga son los huecos y los electrones libres están en minoría. | () Voltaje de corte |
| | () Voltaje efectivo |
| | () Voltaje pico |



2.4.3. Crucigrama



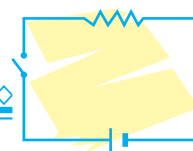
Horizontales

1. Dispositivo cuya resistencia eléctrica depende fuertemente de la iluminación.
4. Letras que simbolizan la unidad de energía habitualmente utilizada para medir la energía eléctrica producida o consumida.
6. Efecto de la corriente eléctrica que tiene lugar cuando un conductor con corriente actúa sobre la aguja de una brújula.
9. Se dice de la impureza que al introducirla en el semiconductor aporta electrones libres.
12. Nombre de elemento químico cuyos átomos se enlazan formando un material semiconductor.
13. Tipo de diodo semiconductor que emite luz al pasar corriente eléctrica por él.
15. Suma de las caídas de voltaje en la parte externa de un circuito y en el interior de la fuente.
16. Dispositivo cuya resistencia eléctrica depende fuertemente de la temperatura.
17. Material cuya conductividad eléctrica ocupa un lugar intermedio entre los semiconductores y los dieléctricos.
19. Resistor con tres terminales, uno de los cuales está unido a un contacto que puede deslizarse a través del resistor.

20. Dispositivo o circuito que convierte corriente alterna en directa.

Verticales

2. Forma que tiene el gráfico de voltaje en función del tiempo correspondiente a un enchufe habitual.
3. Nombre del instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.
5. Portador de carga positiva en un material semiconductor.
7. Nombre del instrumento de medición de la intensidad de corriente.
8. Dispositivo semiconductor cuya invención representó una gran revolución en la electrónica.
10. Magnitud eléctrica que constituye una medida de la oposición que presenta un dispositivo al establecimiento de una corriente eléctrica en él.
11. Se dice de la impureza que al introducirla en el semiconductor conduce a la aparición de huecos.
14. Tipo de conexión habitualmente utilizada en los circuitos eléctricos de las viviendas.
18. Dispositivo que puede conducir corriente eléctrica cuando sus terminales tienen cierta polaridad y apenas conducir cuando la polaridad es inversa.



2.4.4. Actividades de repaso

1. Comenzando con el término “Corriente eléctrica”, confecciona un diagrama que conecte conceptos e ideas como los siguientes: portadores de carga, campo eléctrico, efectos de la corriente, corriente directa, corriente alterna.
2. Intenta responder, resumidamente, las siguientes preguntas formuladas al inicio de la unidad: ¿En qué consiste la corriente eléctrica? ¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista? ¿Qué efectos puede producir? ¿Cuáles son las magnitudes básicas que la caracterizan y cómo operar con ellas? ¿Qué peculiaridades tiene en los metales, electrolitos, gases y semiconductores?
3. Caracteriza las siguientes magnitudes eléctricas: a) intensidad de corriente, b) diferencia de potencial o voltaje, c) potencia eléctrica, d) fem, e) resistencia eléctrica.
4. Explica e ilustra mediante ejemplos, en qué consisten: a) la ley de Ohm, b) la ley de Faraday de la electrólisis, c) un semiconductor tipo n , d) un semiconductor tipo p , e) una conexión en serie de dispositivos eléctricos, d) una conexión en paralelo.
5. Caracteriza los siguientes dispositivos: a) potenciómetro, b) divisor de voltaje, c) reóstato, d) termorresistencia, e) fotorresistencia, f) diodo semiconductor, g) LED.
6. Al desplazar un pedazo de alambre, se mueve una cantidad inmensa de electrones con carga negativa y de núcleos atómicos con carga positiva en determinada dirección. ¿Constituye esto una corriente eléctrica? Explica.
7. El haz de electrones que se mueve hacia la pantalla en el tubo de pantalla de un televisor tradicional representa una corriente eléctrica. ¿Cuál es el sentido de dicha corriente? Argumenta.
8. ¿Cuál será la diferencia física entre el filamento de un bombillo de 60 W y otro de 100 W, si ambos son de wolframio?
9. La resistencia de un calentador eléctrico se rompió y al utilizar la parte en buen estado quedó más corta. ¿Cómo afectará esto su resistencia eléctrica? ¿Y la potencia que desarrolla?
10. Un equipo para 220 V puede ser conectado utilizando conductores más delgados que otro de igual potencia pero de 110 V. ¿Por qué?



11. Para transmitir la energía eléctrica a grandes distancias se utilizan voltajes muy elevados. ¿Por qué eso reduce las pérdidas de energía en las líneas de transmisión?

Cuando las aspas de un abanico que está girando son iluminadas con la luz de una

12. lámpara fluorescente, a veces parecen detenerse o dar vueltas lentamente. Indaga qué relación tiene este efecto con la corriente alterna.

¿Cómo es posible que un pájaro pueda posarse con sus dos patas en una línea de

13. alto voltaje, mientras que para una persona puede resultar peligroso tocar el “vivo” de un enchufe?

Argumenta desde el punto de vista microscópico por qué en una electrólisis la

14. cantidad de sustancia obtenida en los electrodos depende de la intensidad de la corriente eléctrica.

Identifica la fuente, los conductores y los dispositivos de control, en los circuitos de:

15. a) el motor de arranque de un auto, b) una linterna, c) una lámpara del alumbrado de la casa, d) una plancha eléctrica. Describe las principales transformaciones de energía que tienen lugar en dichos circuitos.

Comenta de dónde procede la energía eléctrica y en qué tipo de energía se

16. transforma, durante el funcionamiento de los siguientes equipos e instalaciones: a) central eléctrica, b) linterna, c) abanico, d) televisor, e) lámpara en una instalación que funciona con paneles solares, f) batería mientras se carga.

Los electricistas suelen emplear una lamparita de neón para identificar el “vivo” y el

17. neutro en un enchufe. Uno de sus terminales se sostiene entre los dedos y el otro se introduce en una de las ranuras del enchufe. Si se trata del “vivo”, la lamparita se enciende. ¿Por dónde fluye la corriente si aparentemente el circuito está abierto? ¿Cómo se explica desde el punto de vista microscópico el paso de la corriente por el gas que contiene la lamparita?

¿En qué caso la diferencia de potencial entre los terminales de una batería puede

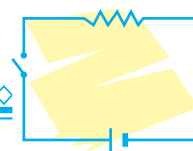
18. ser mayor que su fem?

¿Qué sucede con la intensidad de corriente en la rama principal de un circuito,

19. cuando el número de consumidores conectados en paralelo aumenta? ¿Qué ocurre con la potencia? Argumenta tus respuestas.

Propón una serie de medidas que contribuyan a “ahorrar” energía eléctrica en tu

20. casa.



2.4.5. Ejercicios de repaso

1. Unos 1000 iones de Na^+ pasan en $7.2 \mu\text{s}$ a través de la membrana de cierta célula. ¿Cuál es la intensidad de corriente?

Respuesta: 1.4×10^8 iones/s

2. La intensidad de corriente típica del haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional es $200 \mu\text{A}$. ¿Cuántos electrones por segundo inciden en la pantalla?

Respuesta: 1.25×10^{15} electrones

3. Se carga una batería de automóvil mediante una corriente de 3.0 A durante 10 horas. ¿Qué carga eléctrica pasa a la batería? Las baterías de los automóviles especifican el número de amperes-hora ¿Qué significado tiene esta magnitud?

Respuesta: $1.1 \times 10^5 \text{ C}$

4. Una pila recargable de 1.2 V tiene una etiqueta que dice $1800 \text{ mA}\cdot\text{h}$ a) ¿Cuál es la máxima cantidad de carga que puede acumular? b) Y la máxima cantidad de energía? c) Serán exactas todas las cifras significativas que aparecen en el dato de la etiqueta?

Respuesta: a) 6480 C , b) $7.8 \times 10^3 \text{ J}$ ó 7.8 kJ , c) No

5. Una corriente superior a 10 mA puede ya ser perjudicial para el organismo humano. Una superior a 70 mA que pase por el torso durante más de un segundo podría resultar letal. Los tejidos internos tienen baja resistencia, la de la piel seca es mucho mayor pero si está mojada disminuye. Considera que la resistencia eléctrica de cierta persona que tiene buen contacto con tierra y toca un conductor con una mano mojada es $2.5 \times 10^3 \Omega$ y estima el máximo voltaje que puede tener el conductor para que la corriente no sea: a) perjudicial, b) fatal.

Respuesta: a) 25 V b) 175 V

6. Debido a su alta resistividad y resistencia a la oxidación, el nicromo (aleación de níquel y cobre) es utilizado en elementos calefactores, como por ejemplo en tostadoras. Considera un alambre de nicromo de 5.0 m de largo y 0.64 mm de diámetro y determina: a) su resistencia eléctrica, b) la intensidad de corriente al conectarlo a un enchufe de 110 V . La resistividad del nicromo es $1.5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$

Respuesta: a) 23 , b) 4.7 A .





7. ¿Cuál es la potencia eléctrica del alambre de nicromo del problema anterior? ¿Y si se conecta a un enchufe de 220 V?

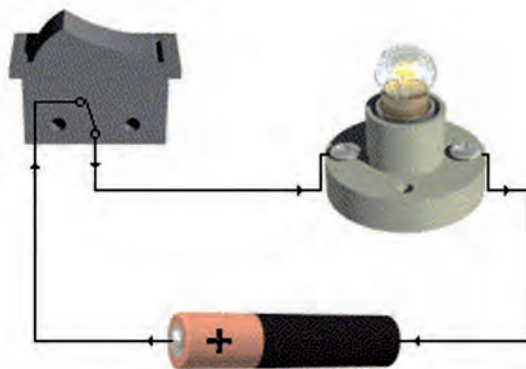
Respuesta: $5.2 \times 10^2 \text{ W}$; se cuadruplica: $2.1 \times 10^3 \text{ W}$

8. El foco de un automóvil, previsto para operar con una batería de 12 V, es de 40 W.
a) ¿Qué resistencia eléctrica tiene su filamento cuando está encendido? b) ¿Tendrá el mismo valor cuando está apagado? Argumenta.

Respuesta: a) 3.6Ω , b) No

9. Una pila eléctrica con una fem de 1.50 V y una resistencia interna de 0.283Ω se conecta a un pequeño bombillo cuya resistencia es 10.0Ω . Determina: a) la intensidad de corriente, b) la diferencia de potencial en los terminales del bombillo?

Respuesta: a) 146 mA, b) 1.46 V

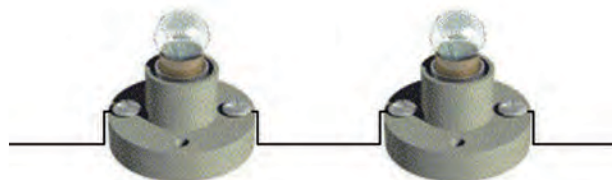


10. Una batería tiene una fem de 12.0 V y una resistencia interna de 0.050Ω . Sus terminales se conectan a dispositivo cuya resistencia es 3.0Ω . Determina: a) la intensidad de corriente, b) la diferencia de potencial en el resistor, c) la potencia desarrollada en el resistor, d) la caída de voltaje debida a la resistencia interna de la batería, e) la potencia desarrollada en la resistencia interna de la batería, f) la potencia desarrollada por la batería.

Respuesta: a) 3.9 A, b) 12 V, c) 46 W, d) 0.20 V, e) 0.77 W, f) 47.2 W

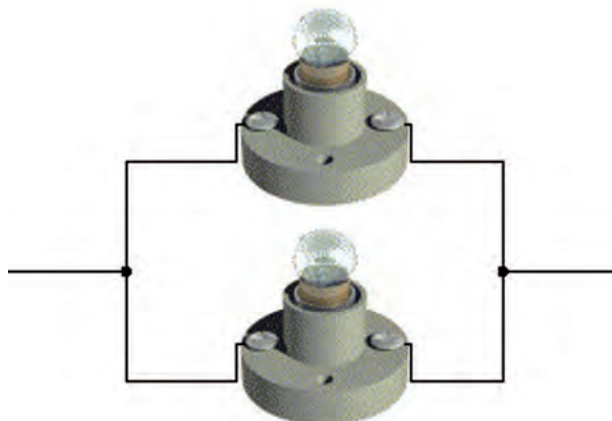
11. ¿Cuál será la resistencia total o equivalente de dos bombillos, cuyos filamentos tienen resistencias de 7Ω y 12Ω si se conectan: a) en serie, b) en paralelo.

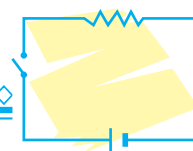
Respuesta: a) 19Ω , b) 4.4Ω .



12. Se dispone de un alambre de nicromo de 70.0Ω para confeccionar un calentador. ¿Cuál será su potencia si: a) se aplica a sus extremos una diferencia de potencial de 110 V, b) el alambre se corta en dos partes iguales, las cuales se conectan en paralelo al enchufe de 110 V?

Respuesta: a) 173 W, b) 692 W





13. La resistencia de cada bocina de cierto equipo estéreo es $3.00\ \Omega$ y están previstas para una potencia máxima de 55 W . Si en los circuitos de cada bocina se colocan fusibles de 4.00 A , ¿estarán debidamente protegidas de sobrecorrientes?

Respuesta: No

14. Una secadora de cabello está diseñada para $1.2 \times 10^3\text{ W}$ y 110 V . a) ¿Cuál es su resistencia? b) Compara su potencia con la que desarrollaría si se conectara a un enchufe de 220 V y su resistencia permaneciera la misma.

Respuesta: a) $10\ \Omega$, b) se cuadruplicaría: $4.8 \times 10^3\text{ W}$.

15. La intensidad de corriente en cierto calentador de 110 V es 14 A . a) ¿Cuál es su potencia? b) Si el calentador funciona 1 hora diaria y el costo del kWh es $\$0.95$, ¿cuánto habrá que pagar por el uso del calentador al cabo de 30 días?

Respuesta: a) $1.5 \times 10^3\text{ W}$, b) $\$43$

16. En una casa hay tres bombillos “ahorradores” de 20 W y otros dos de filamento de 60 W . Cada uno de estos dispositivos permanece encendido 3 horas al día. Determina el costo de la energía “consumida” por dichos bombillos en un mes (30 días) si cada kWh cuesta $\$0.95$.

Respuesta: $\$15$

17. Una familia sale de vacaciones 20 días y deja encendida una lámpara de 60 W . ¿Qué representa esto en el recibo mensual, si el costo del kWh es $\$0.95$?

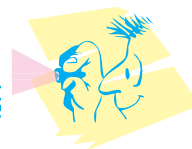
Respuesta: $\$27$



3

NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ





3.1. Introducción

En este capítulo iniciamos el estudio de la Óptica como tal. En particular, abordaremos, aunque de un modo general, dos de las preguntas centrales de este curso: *¿Qué es la luz?* y *¿Cómo se propaga?* Veremos que en la solución de estas cuestiones participaron científicos sobresalientes y que las respuestas fueron evolucionando con el desarrollo de la ciencia.

Los fenómenos relacionados con la luz tienen gran importancia en la vida del hombre y en general en nuestro planeta. Se afirma que más del 80% de la información que posee la mayoría de las personas es adquirida a través del ojo, por medio de la luz. Por otra parte, el hombre ha creado numerosos equipos, en cuyo funcionamiento se emplea la luz, entre ellos el microscopio, el telescopio, la fibra óptica, el láser. Sin la luz, en particular la luz solar, serían imposibles importantes procesos que han ocurrido y ocurren en la naturaleza, como la formación de combustibles fósiles, la fotosíntesis de las plantas, el ciclo del agua.

En la figura 3.1 se muestran imágenes de importantes dispositivos ópticos y en la Tabla 3.1 se reseñan algunos hechos relevantes relacionados con la luz.

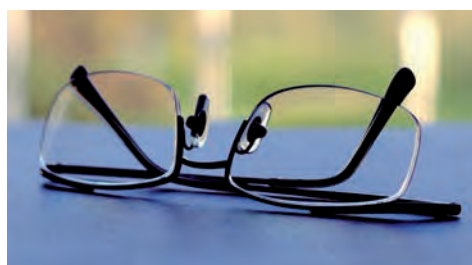


Fig. 3.1. Ejemplos de dispositivos ópticos frecuentemente utilizados.



Tabla 3.1. Algunos hechos relevantes relacionados con la luz.

Primeras ideas acerca de la reflexión de la luz y aplicación de ellas a espejos	Euclides, s. III a.n.e
Mediciones de ángulos de incidencia y de refracción	Ptolomeo, s. II d.n.e
Idea de que la luz procedente de los objetos forma una imagen de ellos en el ojo	Alhazen, s. XI
Desarrollo de lentes para mejorar la visión	s. XIII
Microscopio de varias lentes	Hacia 1600
Primer telescopio astronómico	Galileo, 1609
Ley de la refracción	Snell, 1621
Explicación de la formación de la imagen en la retina del ojo	Kepler, s. XVII
Primeras experiencias sobre difracción de la luz	Grimaldi, 1665
Descubrimiento de células, corpúsculos de la sangre, bacterias, mediante el microscopio	1665 -1680
Descomposición de la luz en haces de diferentes colores	Newton (1666-1672)
Primeros datos (astronómicos) a partir de los cuales se calculó la velocidad de la luz	Roemer, 1676
Fundamentación de la teoría ondulatoria de la luz	Huygens, 1690
Publicación de "Óptica" por Isaac Newton	1705
Realización e interpretación de experimentos de interferencia de la luz	Young, 1801
Primera cámara fotográfica	1826
Medición de la velocidad de la luz en la Tierra	Fizeau, 1849
Descubrimiento del efecto fotoeléctrico	Hertz, 1887
Confirmación de la naturaleza electromagnética de la luz	1888.
Refutación de la noción de éter luminífero. Hipótesis cuántica de la luz	Einstein, 1905
Invencción del láser	Maiman, 1960
Comunicación mediante fibras ópticas entre oficinas, ciudades, continentes	1977, 1985, 1990
Puesta en órbita del telescopio espacial Hubble	1990



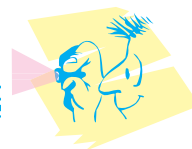
Sir Isaac Newton (1642-1727). Entre otros aportes, dedujo la ley de la gravitación universal, inventó el cálculo infinitesimal y realizó experimentos sobre la naturaleza de la luz y el color.

3.2. Naturaleza de la luz

En este apartado intentamos una respuesta, al menos inicial, a la pregunta *¿Qué es la luz?*

En el siglo XVII, algunos científicos, como Isaac Newton (1642-1727), suponían que la luz está compuesta de **corpúsculos** o partículas, mientras que otros, como Christiaan Huygens (1629-1695), consideraban que es una **onda**.

Newton imaginaba que las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta. Según él, la intensidad de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos emitida en determinado intervalo de tiempo.



La hipótesis anterior permite explicar el decrecimiento de la iluminación de una pequeña fuente al aumentar la distancia.

Así, supongamos que la iluminación de la superficie es directamente proporcional a la cantidad de partículas que llega a ella por unidad de área en la unidad de tiempo. Si la cantidad de partículas emitida por la fuente en la unidad de tiempo es N_o , entonces, a una distancia r de la fuente las partículas se encontrarán distribuidas en una esfera de área $4\pi r^2$ (Fig. 3.2), por lo que la cantidad que corresponde a la unidad de área es solo $N_o/4\pi r^2$. De aquí se infiere que la iluminación decrece con el cuadrado de la distancia, lo cual se ve confirmado por los experimentos.

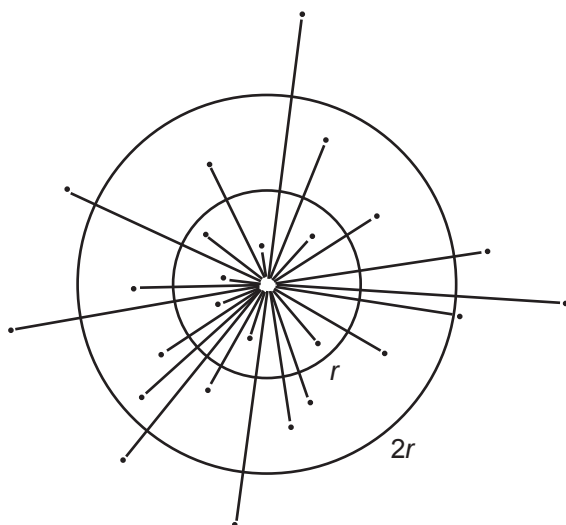


Fig. 3.2. La cantidad N_o de partículas emitidas por una fuente puntual en la unidad de tiempo, se distribuye en un área esférica cada vez mayor. A la distancia r corresponden $N_o/4\pi r^2$ partículas por unidad de área.

Para Newton, la reflexión de la luz era semejante al choque perfectamente elástico de una bola con cierta superficie.

La refracción de la luz al pasar de un medio a otro más denso la explicaba suponiendo que al incidir en la superficie de separación, la atracción de las partículas del medio más denso origina un aumento en la componente de la velocidad perpendicular a la superficie. En la figura 3.3 se ilustra el modelo corpuscular de la “refracción”: una esferita pasa de cierta superficie a otra de menor elevación, con el consiguiente aumento de velocidad.



Christiaan Huygens (1629-1695). Introdujo y desarrolló la teoría ondulatoria de la luz en el siglo XVII.

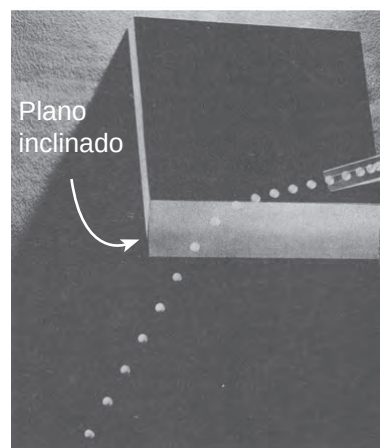


Fig. 3.3. Ilustración del modelo corpuscular de la refracción: una esferita que rueda sobre cierta superficie aumenta su velocidad al pasar a otra superficie situada en un nivel inferior.

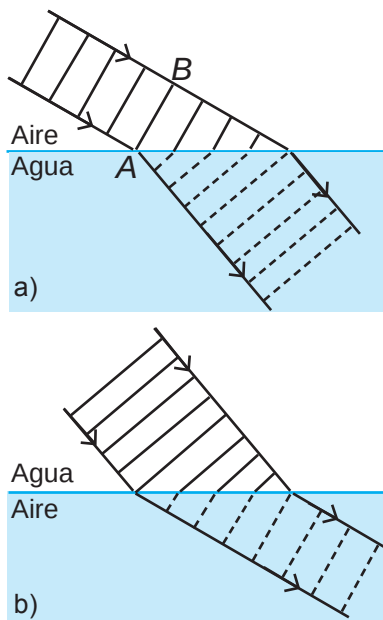


Fig. 3.4. La parte del frente de onda que penetra en un medio distinto: a) disminuye su velocidad y se retrasa, b) aumenta su velocidad y se adelanta.



Thomas Young (1773-1829). Entre otros aportes a la física, realizó e interpretó experimentos de interferencia luminosa, que apoyaron el modelo ondulatorio de la luz.

En cierto modo, el modelo corpuscular daba una explicación de la reflexión y la refracción separadamente, pero cuando se trataba de esclarecer la ocurrencia simultánea de ambos fenómenos se hacía complicado. Por otra parte, la hipótesis corpuscular considera que la luz aumenta su velocidad al pasar del aire a otros medios, y las mediciones de velocidad de la luz en agua y otros líquidos, realizadas en la segunda mitad del siglo XIX, mostraron que, por el contrario, disminuía.

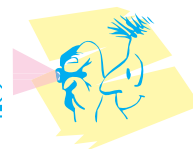
De esta forma, **el modelo corpuscular de la luz permite explicar de modo general una serie de fenómenos ópticos, sin embargo, al entrar en los detalles se complica, o falla.**

Para explicar la desviación que tiene lugar cuando la onda incide formando cierto ángulo con la superficie de separación, Huygens supuso que la parte del frente de onda que penetra en un medio distinto adquiere diferente velocidad, debido a lo cual puede retrasarse (Fig. 3.4a), o adelantarse (Fig. 3.4b), respecto a la otra parte.

El experimento de interferencia de la luz realizado por Thomas Young (1773-1829) en 1801, y la explicación detallada que Augustin Fresnel (1788-1827) dio de la difracción de la luz, apoyaron la teoría ondulatoria. Posteriormente, el desarrollo de la teoría electromagnética en las décadas de 1870 y 1880 mostró que la luz puede considerarse una onda electromagnética.

Todo lo anterior parecía confirmar definitivamente el modelo ondulatorio de la luz, desarrollado por Huygens y sus seguidores. **A finales del siglo XIX la mayoría de los físicos había desechado el modelo corpuscular y consideraban a la luz una onda electromagnética.**

Las ondas electromagnéticas consisten en la propagación de campos eléctrico y magnético oscilatorios. Son ondas transversales, porque las direcciones en que se producen las oscilaciones de los campos son perpendiculares a la de propagación (Fig. 3.5). Como ya sabes, la velocidad de propagación de ellas en el aire es aproximadamente 300000 km/s, en otros medios es menor, pero de todos



modos muy grande.

Las ondas electromagnéticas se clasifican en varios tipos, atendiendo a determinados rangos de sus frecuencias (Fig. 3.6). Así, en orden creciente de frecuencia tenemos: las ondas de radio habituales, de baja y alta frecuencia; las ondas de FM y de televisión; las microondas; la radiación infrarroja; la luz visible; la radiación ultravioleta; los rayos X; los rayos gamma. Esta gama de ondas electromagnéticas es lo que se conoce como **espectro de las ondas electromagnéticas**. Hasta alrededor de 1880 no se tenía conciencia de ellas. En esa década se llegó al convencimiento de que la luz es una onda electromagnética y Heinrich Hertz produjo las ondas que hoy denominamos ondas de radio. Los rayos X fueron descubiertos en 1895, los rayos gamma se detectaron por primera vez como emisiones de sustancias radioactivas naturales (uranio, radio, etcétera).

Si la luz puede ser considerada una onda electromagnética, como por ejemplo las de radio o televisión, entonces ¿a qué se deben sus diferencias con éstas? La clave de la respuesta está en las palabras **frecuencia** y **longitud de onda**.

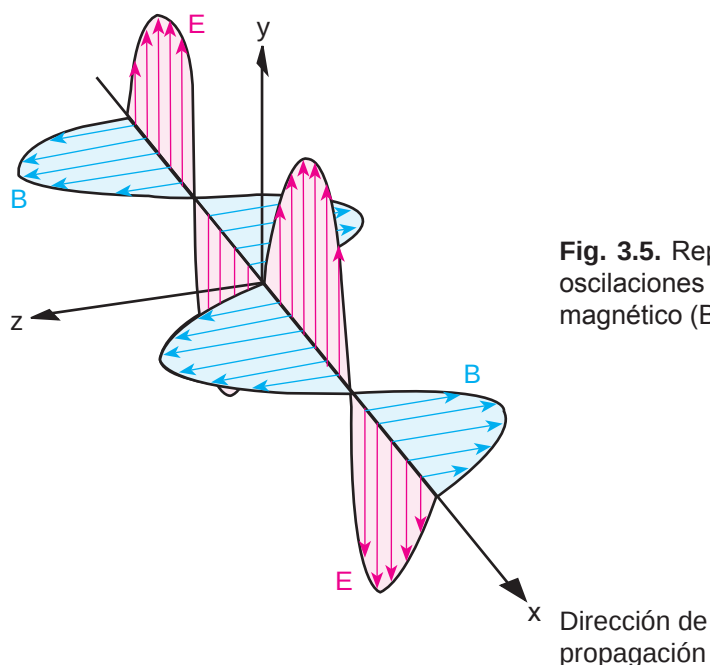


Fig. 3.5. Representación esquemática de las oscilaciones de los campos eléctrico (E) y magnético (B) en una onda electromagnética.

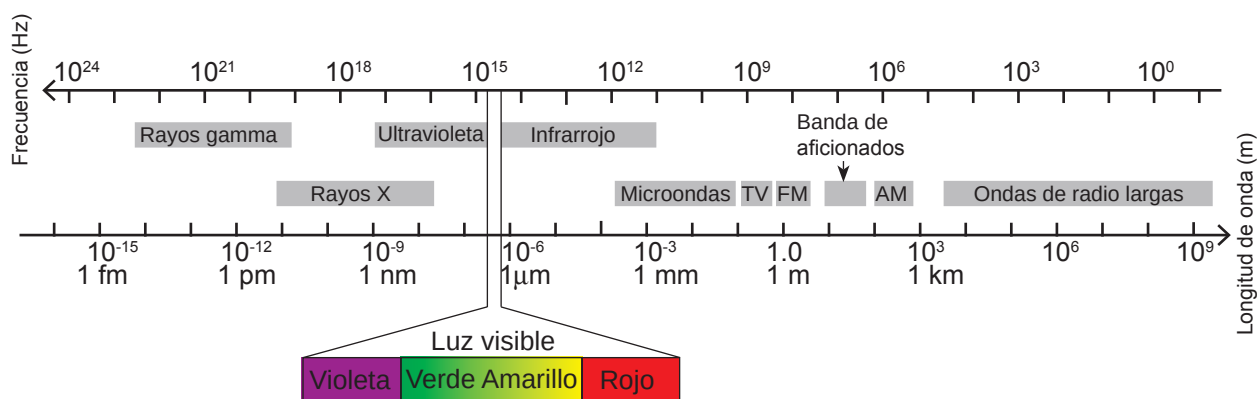


Fig. 3.6. Espectro de ondas electromagnéticas, mostrando la región visible.

De modo similar que el oído humano solo detecta ondas de frecuencias entre unos 20 Hz y 20 kHz, el ojo humano únicamente es sensible a las ondas electromagnéticas de frecuencias que están aproximadamente entre 4.3×10^{14} Hz y 7.5×10^{14} Hz, o lo que es equivalente, de longitudes de ondas entre unos 700 nm y 400 nm ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$), Fig. 3.6.

Se denomina *luz*, o *luz visible*, aquella parte del espectro de las ondas electromagnéticas a la que el ojo humano es sensible, es decir, que es capaz de producir la visión.

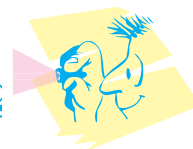


James Clerk Maxwell (1831-1879). Fue uno de los científicos más importantes del siglo XIX. Entre sus aportes está el haber mostrado la naturaleza electromagnética de luz.

En el rango de ondas electromagnéticas visibles hay toda una gama de diferentes frecuencias, que al incidir en el ojo producen las sensaciones de los diversos colores a que estamos acostumbrados: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo (añil) y violeta. Los colores representan, pues, a los efectos de la percepción luminosa, algo similar que los tonos (agudos, bajos) en lo que se refiere a la percepción sonora.

La luz habitual es una mezcla de ondas electromagnéticas de múltiples frecuencias.

Las ondas electromagnéticas de frecuencias inferiores a las que provocan la sensación de rojo se denominan **infrarrojas** y las de frecuencias superiores a las que producen la sensación de violeta, **ultravioleta**.



Ejemplo 3.1. Encuentre la longitud de onda de la luz roja con una frecuencia de 4.7×10^{14} Hz. Compárela con la longitud de una onda de radio de 60 Hz.

Entre la frecuencia y la longitud de onda existe una estrecha relación, a cada frecuencia corresponde determinada longitud de onda y viceversa. Ellas se relacionan por medio de la velocidad de propagación:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

De aquí que $\lambda = \frac{v}{f}$

El valor de la velocidad de la luz podemos considerarlo, aproximadamente, 3.0×10^8 m/s. De modo que al sustituir los valores en la ecuación:

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4.7 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 6.38 \times 10^{-7} \text{ m} = 638 \text{ nm}$$

La longitud de onda de la onda de radio es:

$$\lambda' = \frac{v}{f'} = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{60 \text{ Hz}} = 5 \times 10^6 \text{ m} = 5000 \text{ km}$$

La comparación la hacemos tomando la razón de las dos longitudes de onda:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{5.0 \times 10^6 \text{ m}}{6.38 \times 10^{-7} \text{ m}} = 7.8 \times 10^{12}$$

O sea, la longitud de onda de la onda de radio de 60 Hz es, aproximadamente, 7.8 billones de veces mayor que la longitud de onda de la luz roja.

Pese al rotundo éxito que hacia la década de 1880 había alcanzado el modelo ondulatorio de la luz, muy pronto surgieron serias dificultades.

En aquella época, la onda electromagnética se consideraba similar a una onda mecánica y, por tanto, se suponía que era indispensable un medio para su propagación. Ese medio lo llamaban **éter luminífero**, y se pensaba que es una sustancia sutil que ocupa todo el espacio y penetra todos los cuerpos.



Albert Einstein (1879-1955). En 1905 mostró que la noción de éter luminífero es innecesaria; también formuló la hipótesis acerca del comportamiento cuántico de la luz.

Realiza un breve resumen de la evolución de las interpretaciones de la naturaleza de la luz. Señala algunas limitaciones de los modelos corpuscular y ondulatorio.



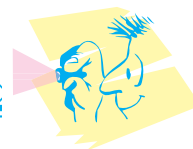
No había evidencia experimental alguna de la existencia del éter luminífero y los físicos se esforzaban por encontrarla. Sin embargo, los experimentos realizados con este propósito por Michelson y Morley en 1887, dieron un resultado negativo. No obstante, era tal la convicción de que las ondas necesitan un medio para propagarse, que no se creyó en la inexistencia del éter luminífero que sugerían los experimentos y se elaboraron complicadas interpretaciones de los resultados experimentales obtenidos, a fin de preservar la idea de su existencia.

En 1905, en su famoso trabajo acerca de la teoría especial de la relatividad, "*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*", Einstein mostró que la noción de éter luminífero es superflua: **la luz, a diferencia de las ondas mecánicas, no requiere de medio alguno para propagarse.**

Por otra parte, en la propia década de 1880, **una serie de experimentos relativos al efecto fotoeléctrico mostraron que la luz posee ciertas propiedades que no pueden ser explicadas suponiendo que es una onda.** Y de nuevo fue Einstein quien en el propio año 1905, en el trabajo "*Sobre un punto de vista heurístico acerca del surgimiento y transformación de la luz*", formuló la hipótesis de su comportamiento en forma de **cuantos**. Aunque a veces éstos se identifican con corpúsculos, como los imaginados por Newton, entre ellos existe una diferencia esencial. Los corpúsculos se refieren a porciones de sustancia que pueden estar en reposo, mientras que los cuantos ni son de sustancia ni es posible encontrarlos en reposo.

En realidad, la luz manifiesta un comportamiento ondulatorio o cuántico, en dependencia de la situación de que se trate.

En este apartado hemos respondido, parcialmente, a una de las cuestiones fundamentales de la Óptica, *¿Qué es la luz?* A continuación comenzaremos a responder otra de las cuestiones clave de la Óptica, *¿Cómo se propaga la luz?*



3.3. Propagación de la luz

Para evitar que la luz de un foco nos deslumbre, interponemos entre él y nuestros ojos una libreta, una mano u otro objeto opaco. Éste y otros hechos de la vida cotidiana sugieren que **en el aire que nos rodea, la luz se propaga en línea recta**. Si no fuese así, entonces la luz del foco no podría llegar a nuestros ojos.

Una manera sencilla de mostrar la propagación rectilínea de la luz es como sigue:

Toma una hoja de papel y confecciona con ella un cono (Fig. 3.7); dirige la abertura mayor sobre un foco y coloca la palma de tu otra mano cerca de la abertura menor. Verás una zona circular iluminada en la palma de tu mano. Esta zona circular corresponde a la prolongación del cono hasta la mano. Si la luz no viajara en línea recta, la zona iluminada en la palma de la mano podría ser diferente: mayor, menor, irregular.

Las líneas rectas que indican la dirección de propagación de la luz, es decir de la onda luminosa, se denominan rayos de luz.

La luz de un foco se propaga en el espacio en todas direcciones, pero con frecuencia limitamos la zona de su propagación, como por ejemplo en la experiencia con el cono de papel, o en la experiencia ilustrada en la figura 3.8. Esa zona dentro de la cual se propaga la luz se denomina **haz de luz**. Los bordes rectos del haz luminoso de la figura 3.8 apoyan la idea de que la luz viaja en línea recta.

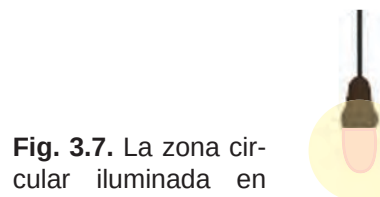


Fig. 3.7. La zona circular iluminada en la palma de la mano corresponde a la prolongación del cono hasta la mano.

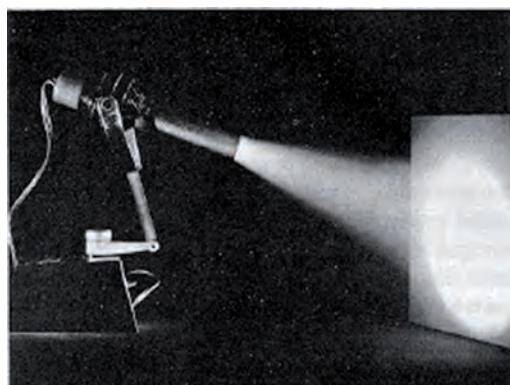
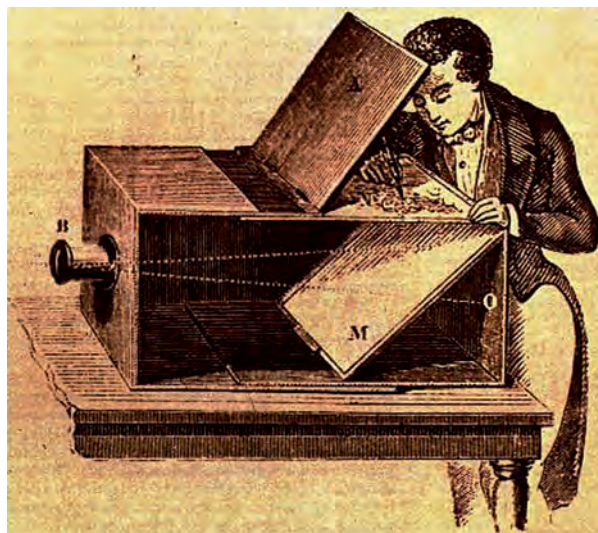
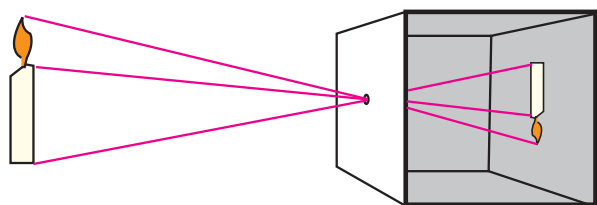


Fig. 3.8. Haz de luz de una linterna. Al introducir partículas de polvo en el aire se hace visible en la oscuridad.



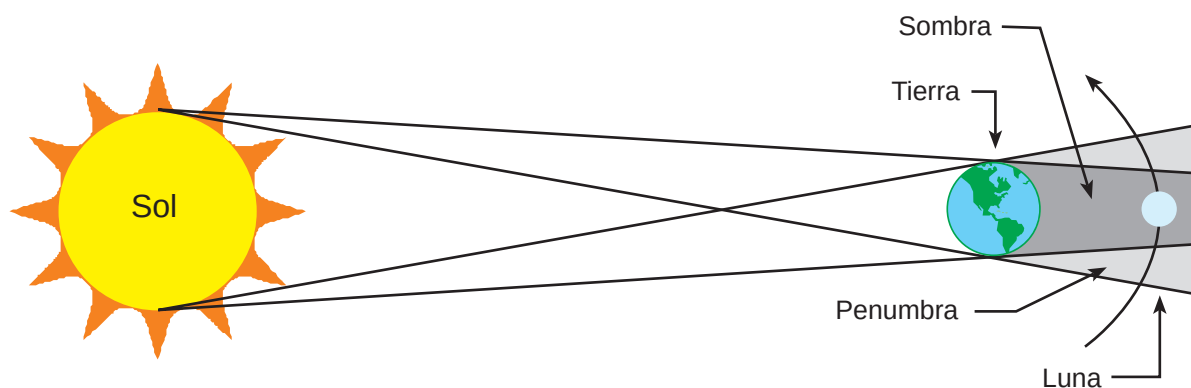
Cámara oscura de finales del siglo XVIII. Utilizada para reproducciones de paisajes y en arquitectura.



Esquema de una cámara oscura. A través del pequeño orificio en una de las caras de la cámara, penetra luz procedente de los objetos, proyectando la imagen de estos sobre la cara opuesta.

La idea de la propagación rectilínea de la luz constituye una de las más antiguas en la Óptica. Aunque se atribuye a Euclides (300 a.n.e.), probablemente era conocida y utilizada mucho antes. Permite explicar numerosos hechos, como la formación de sombras, los eclipses, la formación de imágenes en una **cámara oscura** (antecesora de la cámara fotográfica) y otros. De ella nació el habitual procedimiento de comprobar la rectitud de los objetos alineándolos con nuestro ojo. Pero, **al igual que otras ondas, la luz no siempre se propaga en línea recta.**

En los ejemplos analizados anteriormente hemos supuesto que el medio en el cual se propaga la luz es **homogéneo, o sea que tiene las mismas propiedades en todos sus puntos.** En estas condiciones, las ondas, incluida la luz, se transmiten en línea recta. Sin embargo, **nuestro entorno es de por sí no homogéneo**, está repleto de cuerpos diversos, que actúan sobre la luz y otras ondas de distintos modos, en particular, desviándolas de su dirección de propagación, como estudiamos en la unidad anterior.



Un eclipse de Luna se produce cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, y su sombra oscurece la Luna. Cuando la Luna entra en el cono de sombra de la Tierra, se produce un eclipse total de Luna.



Ya sabemos que cuando las ondas inciden sobre los cuerpos, una parte puede ser reflejada, otra absorbida y otra transmitida, desviándose de su dirección inicial de propagación. Ello puede ser claramente apreciado en el caso de la luz. Si se hace incidir con cierta inclinación un haz de luz sobre un cuerpo de vidrio o la superficie de agua (Fig. 3.9), se observa un haz reflejado y, además, otro que se transmite. Ambos tienen una dirección diferente a la inicial. Los hechos examinados anteriormente permiten concluir que:

En los medios transparentes y homogéneos, la luz se propaga en línea recta, pero en los no homogéneos puede desviarse.

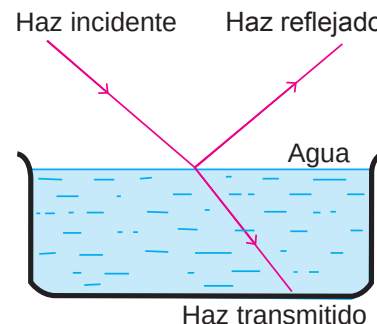


Fig. 3.9. Trayectoria de la luz al incidir en la superficie del agua. El medio aire-agua, considerado en conjunto, no es homogéneo.

La figura 3.10 muestra el esquema de una cubeta que contiene una solución de agua con sal, cuya densidad disminuye al aumentar la altura. Debido a esto, la trayectoria del haz de luz que penetra por la izquierda no es rectilínea. Algo similar tiene lugar cuando una carretera asfaltada se calienta mucho, provocándonos el espejismo, o ilusión óptica, de que, a lo lejos, hay como si fuera agua en ella. En este caso sucede a la inversa que en la experiencia de la figura 3.10, la densidad del aire cerca del asfalto aumenta con la altura, debido a lo cual, ciertos haces procedentes de objetos lejanos, que normalmente incidirían sobre la carretera, son desviados hacia arriba antes de llegar a ella y ser absorbidos por el asfalto.

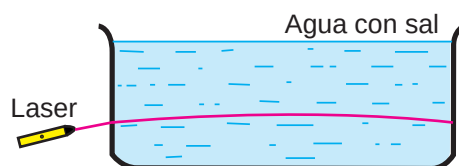
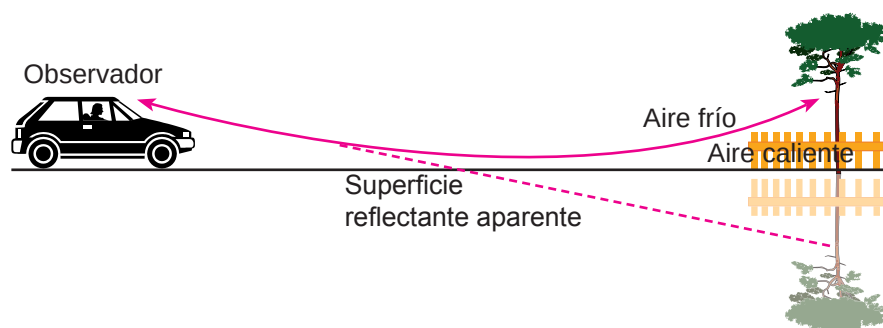


Fig. 3.10. Desviación de un estrecho haz de luz al atravesar una solución de agua con sal cuya densidad disminuye al aumentar la altura.



Dibujo (muy exagerado) de un espejismo en la carretera.

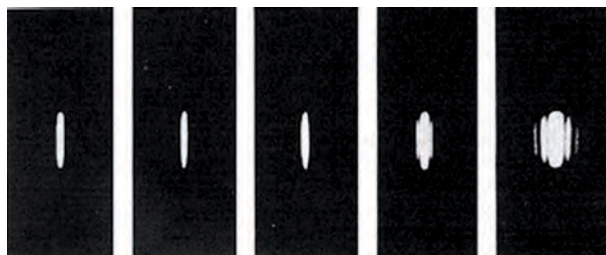


Fig. 3.11. Manchas luminosas producidas en una pantalla por un mismo haz de luz que incide sobre varias rendijas. De izquierda a derecha las rendijas se hacen cada vez más estrechas, pero, paradójicamente, las dos manchas del extremo derecho son más anchas.

Cuando nos sentamos alrededor de una fogata y observamos las caras de las personas que tenemos en frente, notamos ciertas deformaciones. ¿Cómo se explica esto?



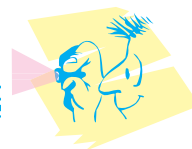
La desviación de la luz de su propagación rectilínea puede tener lugar también en otras situaciones, de cierto modo inesperadas. Así, la experiencia nos dice que es posible obtener un estrecho haz luminoso, haciéndolo incidir sobre una rendija y que mientras menor sea el ancho de ésta, más estrecho será el haz. Esto sugiere la posibilidad de obtener un haz tan fino como queramos, disminuyendo el ancho de la rendija. De ahí que con frecuencia un rayo de luz se interprete –

erróneamente- como un haz cuyo ancho se disminuye indefinidamente. Pero paradójicamente, **al intentar disminuir el ancho del haz estrechando la rendija, se llega a un punto a partir del cual comienza a obtenerse justamente lo contrario: el ensanchamiento del haz** (Fig. 3.11). Si el haz se “abre” al atravesar la rendija, ello significa que la luz no conserva su dirección de propagación inicial. Este sorprendente resultado se debe a la difracción.

La difracción de la luz al pasar por un orificio fue observada ya por Francesco Grimaldi, un sacerdote jesuita, a mediados del siglo XVII. Newton explicó el resultado del experimento de Grimaldi a partir del modelo corpuscular, suponiendo que los corpúsculos luminosos interactúan con el borde del orificio y argumentó que si la luz fuese una onda, la desviación hubiese sido mayor.

Newton no tuvo en cuenta que la mayor o menor desviación de una onda al pasar por un orificio depende de su frecuencia, y que la pequeña desviación observada en el caso de la luz se debe a que su frecuencia es muy grande.

Otra importante cuestión de la Óptica, que forma parte de la pregunta *¿Cómo se propaga la luz?*, es la de su velocidad de propagación. Esta cuestión la abordamos en el siguiente apartado.



3.4. Velocidad de la luz

Galileo Galilei (1564-1642) intentó comprobar que la luz no se propaga instantáneamente de un lugar a otro, sin embargo, no contaba con los medios técnicos necesarios para ello.

El astrónomo danés Olaus Röemer (1644-1710) fue el primero en mostrar, a partir de observaciones astronómicas, que la velocidad de la luz es finita, conclusión que ha sido de trascendental importancia para la ciencia. Advirtió que, medido desde la Tierra, el período de los satélites de Júpiter varía con la época del año. Röemer supuso correctamente que esto no era una irregularidad en el movimiento de los satélites, sino un efecto debido a que en el intervalo que dan la vuelta a Júpiter, la Tierra puede alejarse del planeta o acercarse a él. En la figura 3.12 se ha hecho una representación esquemática de la situación. Supongamos que la Tierra se está moviendo en la parte izquierda de su órbita, alejándose de Júpiter, y que cuando se encuentra en (a) se ve aparecer al satélite (en realidad



Galileo Galilei (1564-1642). Estaba convencido de que la velocidad de la luz es muy grande, pero finita. Realizó grandes aportes a la física, la astronomía y, en general a la ciencia.

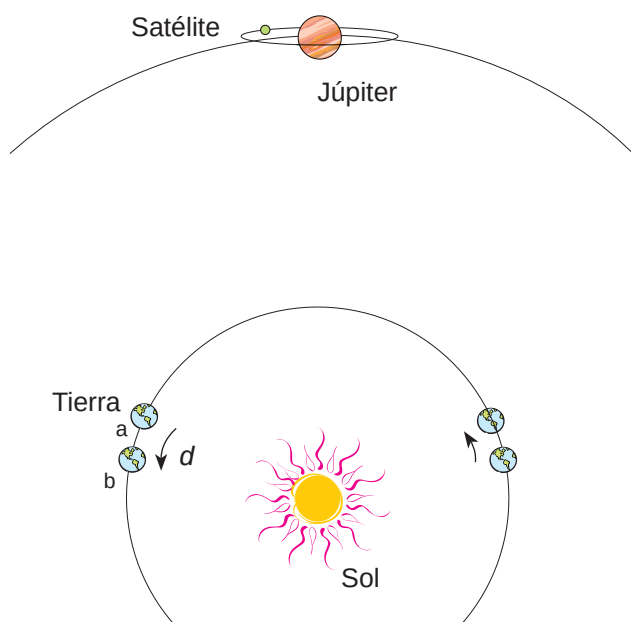


Fig. 3.12. Esquema que ayuda a comprender la aparente irregularidad en el período de uno de los satélites de Júpiter. En la parte izquierda de la órbita de la Tierra su período parece mayor que el real y en la parte derecha menor.



Olaus Röemer (1644-1710). A partir de observaciones astronómicas, mostró que la luz se propaga a velocidad finita. Basándose en los datos obtenidos por él, fue calculada por primera vez la velocidad de la luz.

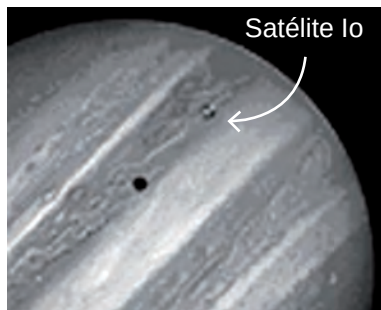


Foto de Júpiter, su satélite más cercano a él, Io y la sombra de éste, tomada por el Telescopio Espacial Hubble.

el satélite debió haber salido de detrás de Júpiter mucho antes, pues para verlo aparecer la luz tuvo que haber viajado una distancia del orden de 10^{12} m). Cuando se vea aparecer nuevamente al satélite, la Tierra se encontrará en (b), porque esta vez la luz habrá tenido que recorrer la distancia anterior, más otra adicional d . Esta distancia adicional recorrida por la luz hace que el período del satélite parezca mayor. Si la Tierra se está moviendo en la parte derecha de la órbita acercándose a Júpiter, el efecto es contrario, el período del satélite parecerá menor que el real. A partir de datos obtenidos por Röemer se calculó para la velocidad de la luz alrededor de 2×10^8 m/s.

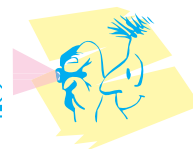
Ejercicio 3.2. El período de Io, uno de los satélites de Júpiter, es 16.69 días. Sin embargo, cuando en su órbita alrededor del Sol, la Tierra se mueve alejándose de Júpiter (Fig. 3.12), el periodo que se aprecia es mayor. Este período observado desde la Tierra llega a exceder al real en unos 143 segundos. Determina la velocidad de la luz a partir de esta información. Considera que la velocidad de la Tierra en su órbita alrededor del Sol es 29.8 km/s.

El máximo período de Io se aprecia cuando la Tierra está en una porción tal de su órbita alrededor del Sol, que se mueve alejándose de Júpiter aproximadamente en la dirección de la línea entre ella y Júpiter. En ese caso, en el intervalo de tiempo desde que Io da la vuelta a Júpiter (16.69 días), la Tierra se ha alejado de Júpiter una distancia:

$$d = vT = \left(29.8 \frac{\text{km}}{\text{s}}\right) \left(16.69 \text{ día} \times \frac{24 \text{ hora}}{1 \text{ día}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}}\right) = 4.30 \times 10^7 \text{ km}$$

Para observar desde la Tierra la nueva aparición de Io, la luz debe recorrer esa distancia adicional, en lo que invierte 143 s, dando la impresión que el período de Io ha aumentado. La velocidad a que la luz recorre esa distancia, es decir, la velocidad de la luz, es:

$$c = \frac{4.30 \times 10^7 \text{ km}}{143 \text{ s}} = 3 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



En 1849, el físico francés Fizeau (1819-1896) logró por primera vez medir la velocidad de la luz mediante una experiencia realizada en la Tierra. Determinó el tiempo empleado por la luz en hacer el recorrido de ida y vuelta entre la terraza de su casa y el vidrio de la ventana de una casa en la cual se reflejaba, situada sobre una colina a unos 8 km. Para determinar ese intervalo de tiempo, colocó una rueda dentada que giraba a gran velocidad delante del haz luminoso. Luego reguló la velocidad de la rueda de modo que la luz que pasaba entre sus dientes tuviera justo el tiempo de llegar hasta la ventana y volver antes de ser ocultada por el siguiente diente. Conociendo la velocidad de rotación de la rueda, Fizeau obtuvo para la velocidad de la luz 315300 km/s.



Armand Fizeau (1819-1896). El primero en medir la velocidad de la luz en la Tierra.

Foucault (1819-1868) perfeccionó el método de Fizeau, sustituyendo la rueda dentada por un sistema de espejos en rotación, y obtuvo un valor de 298000000 m/s.

Sin embargo, fue Michelson quien obtuvo un valor prácticamente igual al hoy aceptado. Como valor aproximado suele tomarse 300000 km/s. Para proporcionar una idea de lo que representa este valor, digamos que un objeto que se mueva con tal velocidad podría dar casi siete y media vueltas alrededor de la Tierra en tan solo un segundo.

Los experimentos realizados por Michelson y Morley en 1887, como ya hemos dicho, sugirieron que el supuesto éter lumínico en el cual se propaga la luz no existe y que la velocidad de ésta en el aire es prácticamente constante.

Hoy se tiene la certeza de que:

La velocidad de la luz en el vacío es constante, independiente de la velocidad de la fuente que la emite, y representa un valor límite.

Así, al ver los faros de un carro que avanza hacia nosotros, el sentido común nos dice que la velocidad de la luz que apreciamos debe ser la suma de la relativa al carro más la del carro respecto a nosotros. Sin embargo, en realidad es la misma, ya esté el carro en reposo o en movimiento.



Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1868). Realizó importantes trabajos sobre la velocidad de la luz.



Albert A. Michelson (1852-1931). Midió la velocidad de la luz y, junto con Morley, realizó experimentos a fin de comprobar la existencia del éter lumínico. Estos experimentos dieron un resultado negativo.

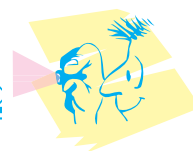
Es tal la confianza que se tiene en la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, que se adoptó como definición un valor para ella: 299 792 458 m/s. A partir de este valor, en 1981 se redefinió el metro como la longitud que recorre la luz en el vacío en un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo.

Para medir distancias astronómicas frecuentemente se utiliza una unidad de longitud llamada **año luz (A.L.)**, que es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un año. Ella equivale, aproximadamente, a 9.5×10^{15} m. La estrella visible más cercana a la Tierra, Alpha Centauri, está a 4.3 años luz, lo que significa que la luz procedente de ella tarda 4.3 años en llegar a la Tierra.

Nuestro sistema solar se encuentra en la galaxia denominada Vía Láctea, cuyo diámetro es de unos 100 000 años luz y el Sol está situado a 30 000 años luz del centro de esta galaxia. La galaxia más próxima a nosotros, Andrómeda, dista dos millones de años luz. Eso significa que si se produce una explosión en alguna estrella de esa galaxia, no será sino hasta después de dos millones de años que registraremos la explosión aquí en la Tierra.

En este capítulo hemos considerado dos de las cuestiones fundamentales de la Óptica, *¿Qué es la luz?* y *¿Cómo se propaga?* Vimos que la respuesta a la primera pregunta ha evolucionado a lo largo de la historia de la ciencia. Muchos fenómenos pueden ser explicados suponiendo que la luz es una onda electromagnética, pero la interpretación de otros requiere retomar el modelo corpuscular de Newton en una nueva forma, en la cual las porciones no son partículas de sustancia, sino cuantos de luz.

En lo que se refiere a la segunda pregunta llegamos a la conclusión que, en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta pero en los no homogéneos puede desviarse. Un ejemplo sorprendente de este último caso lo constituye el fenómeno de la difracción. Por otra parte, conociste que la velocidad de propagación de la luz no solo es finita, sino que además es constante, independiente de la velocidad con que se mueve la fuente que la emite.



En los siguientes capítulos ampliaremos las respuestas a las dos preguntas anteriores. En el que sigue a continuación, la naturaleza de la luz no aparecerá como relevante y al considerar su propagación trataremos los haces estrechos como líneas o rayos. Esta parte de la Óptica comúnmente se denomina **Óptica Geométrica**.

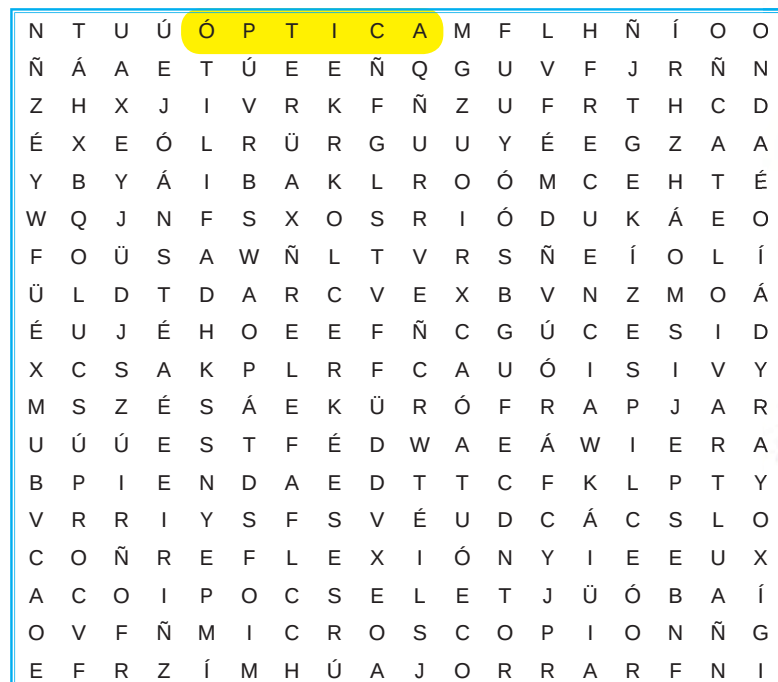


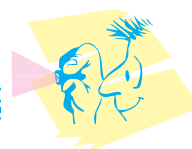
3.5. Actividades de sistematización y consolidación

3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

Óptica	Infrarroja
Luz	Ultravioleta
Láser	Refracción
Microscopio	Rayo
Telescopio	Haz
Éter	Eclipse
Onda	Espejismo
Corpúsculo	Interferómetro
Frecuencia	Año-Luz
Reflexión	
Espectro	





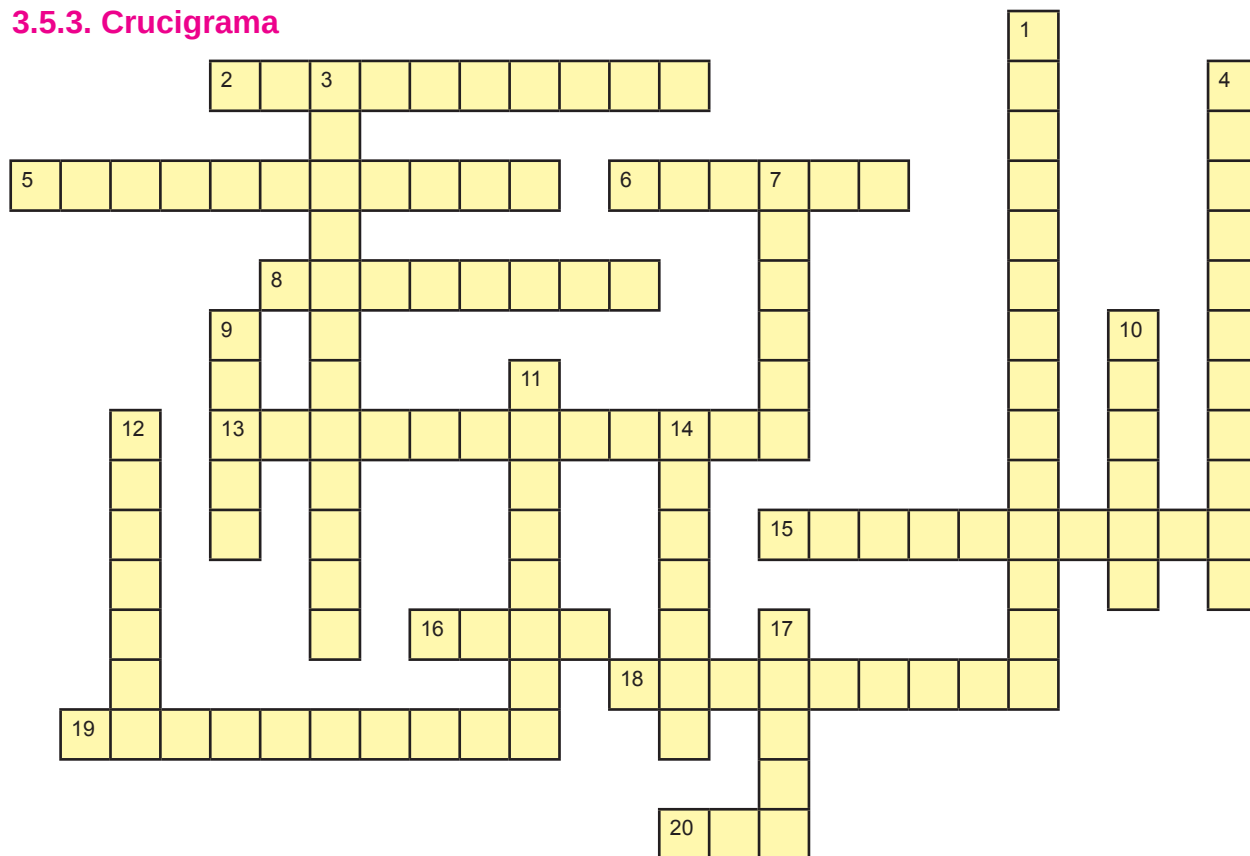
3.5.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Fenómeno cuya explicación dio lugar a la hipótesis acerca de la naturaleza cuántica de la luz. () Christiaan Huygens.
2. Científico que desarrolló el modelo corpuscular de la luz. () Isaac Newton.
3. Parte del espectro de ondas electromagnéticas a la que es sensible el ojo humano. () Ondas de radio.
4. Científico que desarrolló el modelo ondulatorio de la luz. () Suponía que la velocidad de propagación de la luz es muy grande, pero finita.
5. Modelo de la luz el cual supone que su velocidad disminuye al pasar del aire a otro medio más denso. () Ondulatorio.
6. Galileo Galilei. () El primero en mostrar, a partir de observaciones astronómicas, que la velocidad de la luz es finita.
7. Olaus Röemer. () Corpuscular.
8. Armand Fizeau. () Colocó una rueda dentada delante de un haz luminoso, de modo que los dientes bloqueaban la luz y los espacios intermedios la dejaban pasar.
9. Ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda que la luz. () Efecto Fotoeléctrico.
10. Ondas electromagnéticas de menor longitud de onda que la luz. () Rayos X.
11. Modelo de la luz el cual supone que su velocidad aumenta al pasar del aire a otro medio más denso. () Luz.





3.5.3. Crucigrama

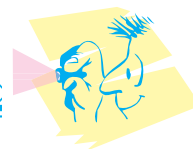


Horizontales

2. Ondas electromagnéticas de frecuencias inferiores a la del color rojo.
5. Modelo que considera a la luz una onda.
6. Unidad de distancia compuesta de dos palabras, que consiste en la distancia recorrida por la luz en un año.
8. Gama de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias.
13. Ondas electromagnéticas de frecuencias superiores a las de color violeta.
15. Rapidez con que se realizan las oscilaciones.
16. Medio en el cual se suponía que se propaga la luz.
18. Ilusión óptica debida a la refracción de la luz en la atmósfera.
19. Fenómeno que tiene lugar cuando la luz pasa de un medio a otro y cambia su velocidad de propagación.
20. Parte del espectro de las ondas electromagnéticas a que el ojo humano es sensible.

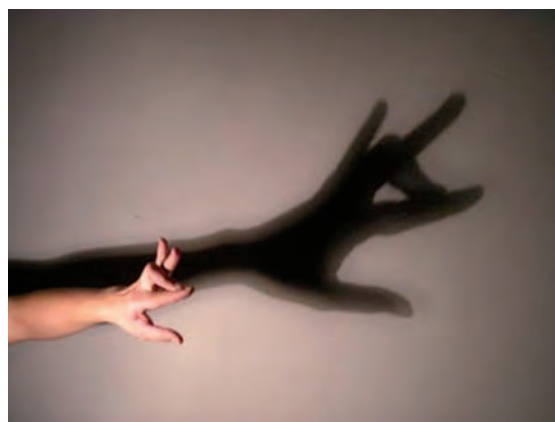
Verticales

1. Nombre de importante dispositivo óptico.
3. Proceso mediante el cual las plantas verdes absorben energía en forma de luz y la transforman en energía química.
4. Modelo que considera que las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta.
7. Nombre de la letra griega utilizada para representar la longitud de onda de las ondas.
9. Uno de los científicos que más contribuyó al desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz.
10. Parte de la Física que estudia los fenómenos relativos a la luz.
11. Científico que demostró que la noción de éter luminífero es innecesaria y formuló la hipótesis acerca del comportamiento cuántico de la luz.
12. Ondas electromagnéticas comprendidas en el rango de longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros.
14. Ocultamiento de un astro o parte de él por otro.
17. Unidad de medida de la frecuencia.



3.5.4. Actividades de repaso

1. ¿Cómo explican la refracción de la luz los modelos corpuscular y ondulatorio? ¿Qué dificultad tiene la explicación que ofrece el modelo corpuscular?
2. Examina la figura 3.6 y menciona ejemplos de radiaciones de frecuencias a) inferiores a la de la luz de color rojo, b) superiores a la de la luz de color violeta.
3. Seguramente sabes que la prolongada exposición a los rayos solares puede resultar dañina para la salud, entre otras cosas, debido a las radiaciones ultravioletas procedentes del Sol. ¿Cómo explicarías qué es la radiación ultravioleta?
4. Las frecuencias de las ondas que corresponden a la luz visible están alrededor de 5.5×10^{14} Hz. Muchos sonidos habituales tienen frecuencias en el entorno de 10 kHz. Compara dichas frecuencias. ¿Cuántas veces mayor es la frecuencia de la luz que la del sonido?
5. Reflexiona acerca de la importancia de las ondas electromagnéticas en el universo y, en especial, para los seres humanos.
6. Representa esquemáticamente un pequeño bombillo y algunos rayos que indiquen la dirección de propagación de la luz emitida por su filamento. ¿Qué forma tendrá el frente de la onda luminosa que procede del bombillo?
7. Un objeto se coloca en el camino de la luz procedente de un foco, dando lugar a zonas de sombra y de penumbra en una pared. Si se coloca el ojo en la zona de sombra, ¿se verá el foco? ¿Y si el ojo se coloca en la zona de penumbra?
8. Explica por qué la mayoría de las sombras que observamos diariamente no tienen los bordes bien definidos.
9. ¿Por qué en un día totalmente nublado, los postes, casas u otros objetos no dan lugar a sombras?
10. Busca en un diccionario el significado de la palabra homogéneo. Ilustra mediante ejemplos concretos dicho significado.
11. ¿Por qué el agua de la cubeta de la figura 1.5 del capítulo 1 no puede considerarse un medio homogéneo, a los efectos de las ondas que se propagan en su superficie?





12. En la experiencia de la figura 3.9, ¿además de la reflexión y transmisión de la luz, tendrá lugar la absorción de parte de ella? Argumenta tu respuesta.
13. Describe diversas situaciones en que la luz se propague en línea recta y otras en que no.



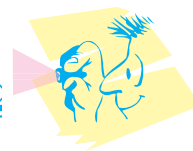
14. Busca el significado de la palabra “espejismo” e indaga acerca de ellos. Explica con tus propias palabras en qué consisten.

15. Como sabes, la densidad de la atmósfera disminuye con la altura. Por eso, a la luz del Sol que penetra en ella al amanecer o al atardecer, le sucede algo parecido que al haz de luz del experimento de la figura 3.10. Eso hace que los días sean varios minutos más largos. Explica por qué, con ayuda de un esquema.

16. Si miras a las estrellas notarás que parecen titilar. ¿Cómo explicarías esto?
17. ¿Por qué es común pensar que la luz se propaga de un lugar a otro instantáneamente?
18. Haz un breve resumen histórico acerca del conocimiento de la velocidad de propagación de la luz.
19. Elabora un esquema o cuadro sinóptico que refleje los conceptos e ideas esenciales estudiados y las relaciones entre ellos.



20. Escribe un resumen de las ideas y ecuaciones esenciales estudiadas en el capítulo.



3.5.5. Ejercicios de repaso

1. A través de un tubo de cartón de 30 cm de largo y 3 cm de diámetro se mira una tira de papel de longitud 1 m colocada en una pared. ¿A qué distancia debes alejarte para que puedas ver completamente la tira?

Respuesta: 10 m

2. Compara la velocidad de la luz con la velocidad del sonido.

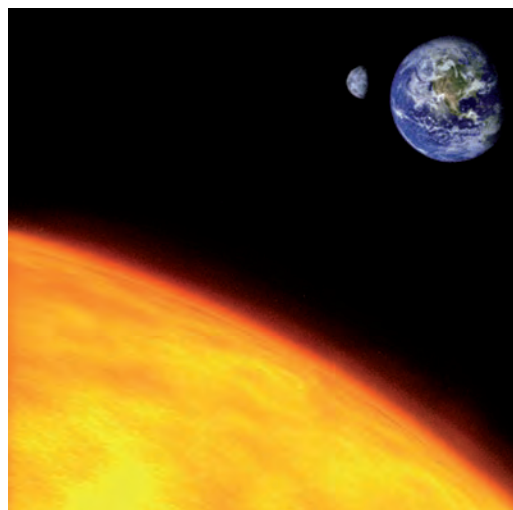
Respuesta: La de la luz es 8.8×10^5 veces mayor

3. Calcula el tiempo que demora la luz del Sol en llegar hasta nosotros, si se sabe que éste se encuentra a 1.50×10^8 km.

Respuesta: 8 min y 20 s.

4. La estrella más cercana a la Tierra después del Sol, Alfa Centauro, se encuentra a 4.3 años luz. ¿A qué distancia, expresada en metros, se encuentra?

Respuesta: 4×10^{16} m.



5. El avión experimental no tripulado X - 43 ha roto el récord de velocidad para un motor de propulsión atmosférica al volar brevemente a unos 7 700 kilómetros por hora, o siete veces por encima de la velocidad del sonido, según ha informado la NASA. Compare la velocidad de la luz con la velocidad del avión X - 43.

Respuesta: La de la luz es 1.4×10^5 veces mayor

6. Encuentre la longitud de onda de la luz amarilla cuya frecuencia es $f = 5.17 \times 10^{14}$ Hz.

Respuesta: $\lambda = 580$ nm

7. Encuentre la longitud de onda de microondas de frecuencia 1×10^{10} Hz.

Respuesta: 3 cm

8. La distancia entre la Tierra y el Sol es 1.5×10^{11} m. ¿Cuánto tarde la Luz en viajar del Sol a la Tierra?

Respuesta: 500 s

4 ÓPTICA GEOMÉTRICA





Óptica geométrica

En la unidad anterior viste que en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta, pero que en los no homogéneos puede desviarse. Esto te permitió responder una serie de preguntas, por ejemplo: ¿cómo se forman las sombras?, ¿en qué consisten los eclipses?, ¿cómo se explican los espejismos? Sin embargo, para explicar la formación de imágenes mediante espejos y lentes y, lo que es más importante, comprender el funcionamiento de valiosos dispositivos ópticos, se requiere ir más allá y estudiar ciertas leyes que se cumplen durante la reflexión y refracción de la luz.

En esta unidad examinaremos las siguientes cuestiones clave:

¿En qué consisten las leyes de la reflexión y refracción de la luz? ¿Cómo se explica la formación de ciertas imágenes a partir de las leyes de la reflexión y la refracción? ¿Qué trayectoria siguen los rayos al incidir en lentes y espejos esféricos? ¿Cómo se explica la formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos? ¿Cuál es el principio de funcionamiento óptico del ojo humano y de instrumentos como la lupa, el microscopio y el telescopio?

En consecuencia, en este capítulo profundizaremos en la respuesta que hemos dado a la pregunta *¿Cómo se propaga la luz?* y, además, abordaremos la tercera pregunta planteada al iniciar el curso, *¿Cuáles son algunas importantes aplicaciones de la Óptica?*

Al describir estas regularidades y aplicaciones, utilizaremos diagramas y ecuaciones que se apoyan en el trazado de líneas rectas y el uso de la geometría. De ahí el nombre de **Óptica Geométrica** que recibe esta parte de la Óptica.

4.1. Reflexión de la luz

Pese a que por lo común asociamos la reflexión de la luz exclusivamente con espejos y superficies pulimentadas, ella es un fenómeno muchísimo más extendido. Es, además,

¿Cómo es posible que si la luz del Sol no penetra directamente en el aula, percibamos tanta claridad dentro de ella?



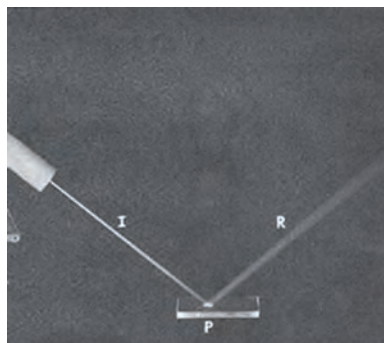


Fig. 4.1. Reflexión regular o especular. Ocurre en una dirección bien definida.

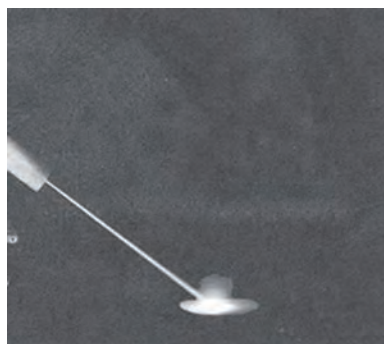


Fig. 4.2. Reflexión irregular o difusa. Ocurre en variadas direcciones.

esencial para la visibilidad de los cuerpos que nos rodean.

Pueden verse ciertos cuerpos, digamos, el Sol, las estrellas, las lámparas, gracias a que emiten luz por sí mismos y ésta llega hasta nuestros ojos; pero la inmensa mayoría de los cuerpos –las paredes de la habitación, los árboles, la Luna, el libro que leemos, el lápiz con que escribimos, etcétera– son visibles sólo en virtud de que **reflejan** la luz que reciben. La proporción de luz reflejada difiere de un cuerpo a otro. Es debido a esto que, por ejemplo, en una habitación semioscura vemos unos cuerpos mejor que otros.

Los cuerpos que emiten luz por sí mismos se denominan **fuentes de luz propia** y, los que la reflejan, **fuentes de luz reflejada**.

La reflexión puede tener características diferentes, dependiendo de la superficie sobre la que incide la luz. Así, si un haz de luz incide sobre una superficie muy lisa, como la de un espejo o la superficie del agua, la reflexión tiene lugar en una dirección bien definida y se dice que es regular, o **especular** (término que deriva de espejo) (Fig. 4.1). Por el contrario, si la superficie no es lisa, la reflexión se produce en muy variadas direcciones y se llama irregular, o **difusa** (Fig. 4.2). **La reflexión de la luz que ocurre en la inmensa mayoría de los cuerpos que nos rodean es difusa y gracias a esto es que llega hasta nuestros ojos y podemos verlos**, aun cuando cambiemos de lugar. Si la reflexión fuese especular, esto sería imposible (Fig. 4.3).

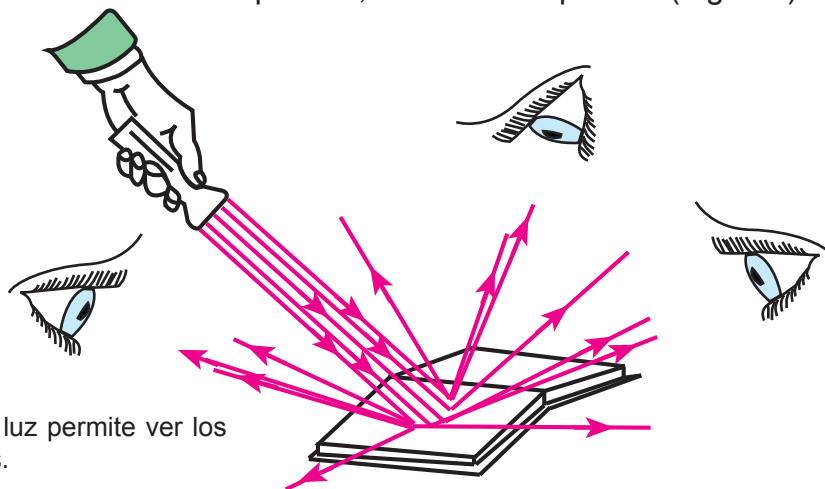


Fig. 4.3. La reflexión difusa de la luz permite ver los objetos desde distintas direcciones.



4.1.1. Leyes de la reflexión

Como acabamos de señalar, la reflexión difusa es de gran importancia en nuestra vida diaria, pero puesto que tiene lugar en variadas direcciones, no podemos distinguir en ella regularidades o leyes; en cambio, en la reflexión especular sí. Examinemos, pues, la reflexión en un **espejo**. Este es uno de los **dispositivos ópticos** más simples. Los antiguos egipcios y griegos ya los empleaban, aunque no de vidrio, sino de metal pulimentado.

Indaga acerca de la fabricación y utilización de espejos a lo largo de la historia de la civilización.



Sabemos que al hacer incidir un haz de luz sobre un espejo, la dirección del haz reflejado depende de la dirección del haz incidente. Cabe pues preguntarse: *¿Cómo se relaciona la dirección del haz reflejado con la del incidente?*

Las direcciones de los haces pueden registrarse con ayuda de un pedazo de cartulina blanca. Luego de varios ensayos, advertiremos que solo es posible registrar las “huellas” de ambos haces en la cartulina, cuando ésta es perpendicular a la superficie del espejo (Fig. 4.4a). Este resultado es una expresión de la **primera ley de la reflexión**:

El rayo reflejado está en el plano que contiene al rayo incidente y es perpendicular al espejo.

Las direcciones de los haces en la cartulina pueden indicarse por medio del ángulo que forman con el espejo, no obstante, **lo usual es medir los ángulos respecto a la línea perpendicular (normal) al espejo en el punto de incidencia (NN')** (Fig. 4.4b). El ángulo que forma el rayo incidente con dicha línea se llama **ángulo de incidencia (i)** y el que forma el rayo reflejado, **ángulo de reflexión (r)**. El rango en que estos ángulos puede variar es, por supuesto, desde 0° hasta 90° .

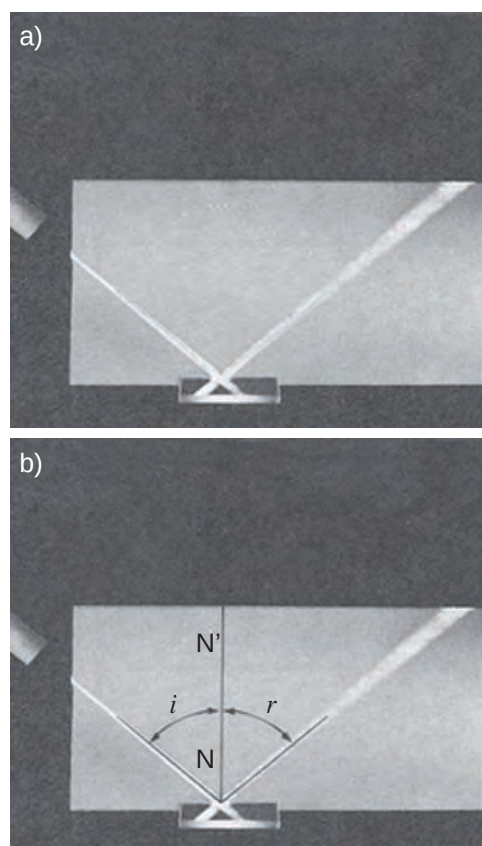


Fig. 4.4. a) El rayo reflejado está en el plano que contiene al rayo incidente y es perpendicular al espejo. b) Los ángulos de incidencia y reflexión se miden respecto a la línea perpendicular al espejo en el punto de incidencia.

Determina los ángulos de incidencia y de reflexión en cada caso de la figura 4.5.

Consideremos ahora la figura 4.5. En ella se muestra un fino haz de luz láser que incide sobre la superficie de un cuerpo de vidrio con diferentes inclinaciones. Midiendo los ángulos de incidencia y de reflexión es posible establecer la relación entre ellos.

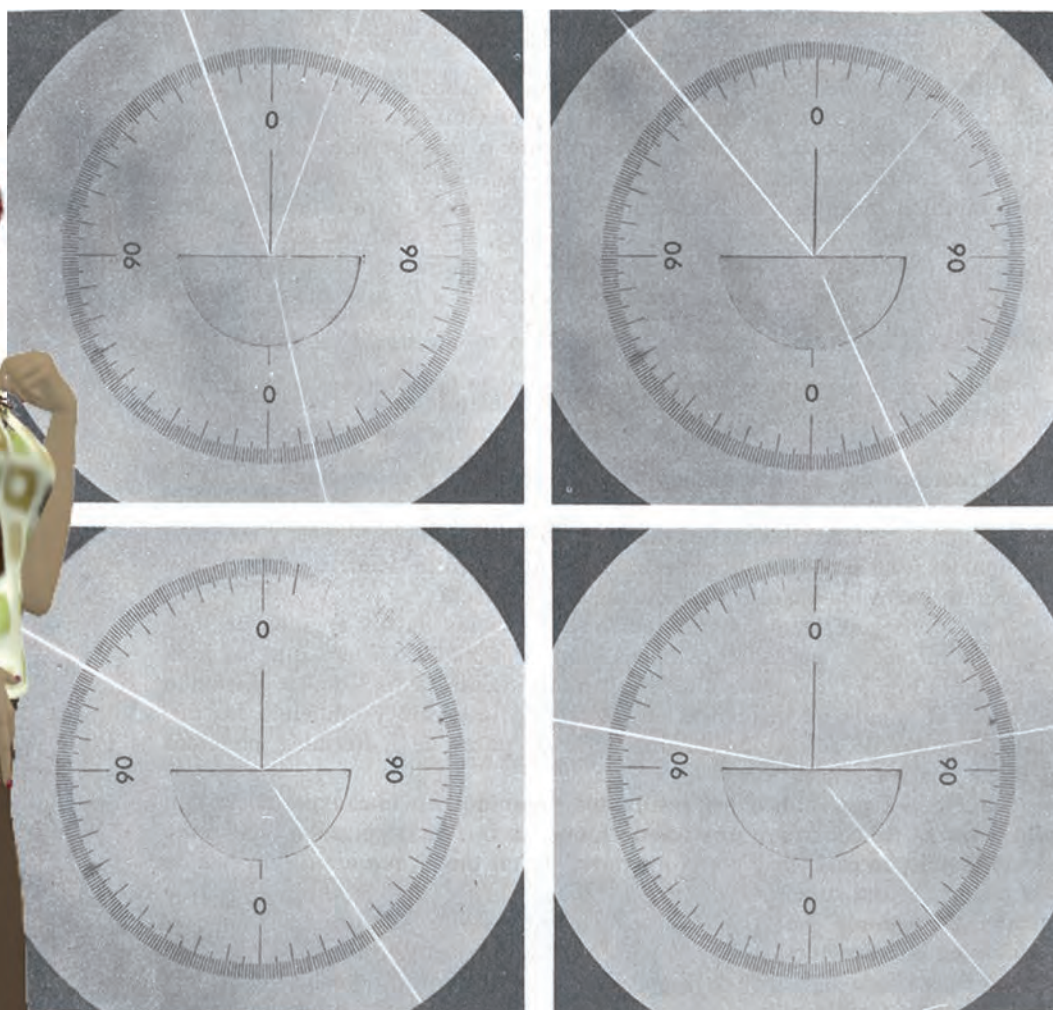


Fig. 4.5 Reflexión y refracción de un haz estrecho de luz al incidir sobre un cuerpo de vidrio.

Experiencias similares a la anterior, con diversas superficies, permiten llegar a la siguiente conclusión, denominada **segunda ley de la reflexión**:

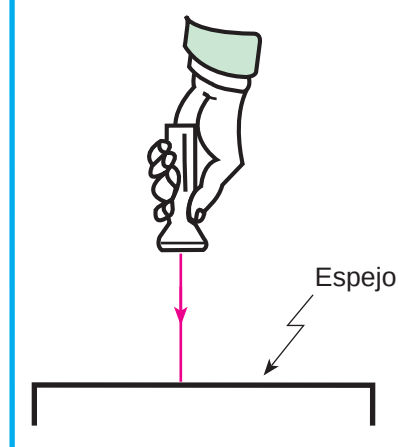
El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Cabe subrayar que aunque hemos examinado las leyes de la reflexión considerando superficies especulares planas, ellas son igualmente válidas si la superficie es curva.



Fíjate además que si sobre el cuerpo de la figura 4.4 hiciésemos incidir la luz según la dirección del haz reflejado, entonces, de acuerdo con la segunda ley de la reflexión, realizaría el recorrido exactamente inverso, emergiendo del cuerpo de vidrio según la dirección que tenía el haz incidente. Este resultado se conoce como **reversibilidad de la trayectoria de la luz**.

Ejemplo 4.1. Una persona hace incidir un haz de luz sobre un espejo perpendicularmente a su superficie, como se ilustra en la figura. a) ¿Cuál es el valor del ángulo de incidencia de la luz sobre el espejo? b) ¿Cuál es la dirección del haz reflejado?



a) Puesto que el ángulo de incidencia es el formado por el rayo incidente y la normal a la superficie, $i = 0$, ya que según se dice en el enunciado del problema, la luz incide perpendicularmente al espejo.

b) De las leyes de la reflexión sabemos que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, así que $r = i = 0$. Esto significa que el haz reflejado también está dirigido según la normal a la superficie, pero por supuesto, del espejo hacia la linterna.

¿Cómo se explican las imágenes que vemos al mirar hacia un espejo plano?

4.1.2. Imágenes formadas mediante un espejo plano

En este apartado responderemos a la pregunta *¿Cómo se explica la formación de ciertas imágenes mediante las leyes de la reflexión?*

No limitaremos a analizar la formación de imágenes mediante un espejo plano.

Consideremos primeramente un objeto muy pequeño, O , situado frente a un espejo plano (Fig. 4.6a). Hemos representado un haz de luz que diverge de él e incide en el espejo. Si utilizamos la segunda ley de la reflexión, podemos encontrar cuál es la trayectoria que sigue el haz después de reflejarse. Para esto es suficiente aplicar la ley a los rayos 1 y 2 que forman los bordes del haz (Fig. 4.6b). Cuando se coloca el ojo como se muestra en la figura 4.5c,



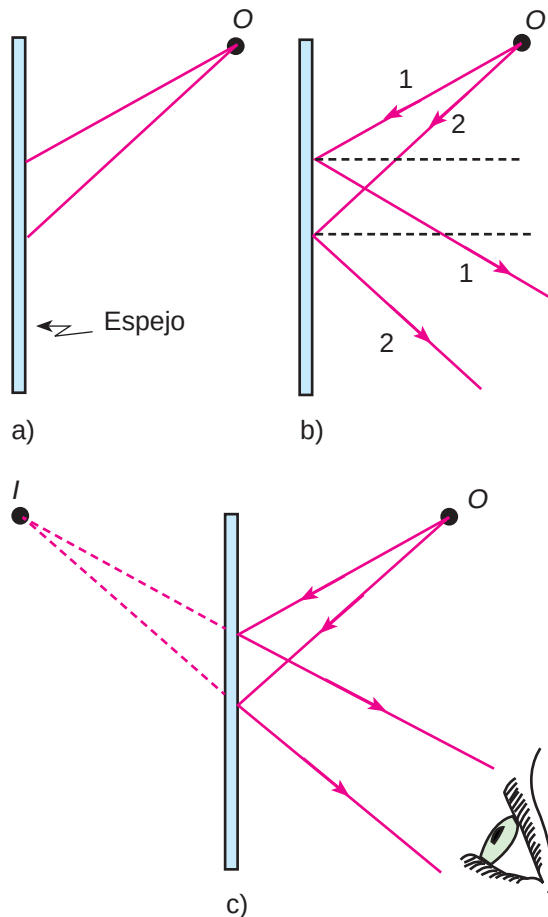


Fig. 4.6. Esquema que ayuda a comprender la formación de la imagen de un pequeño cuerpo mediante un espejo plano.

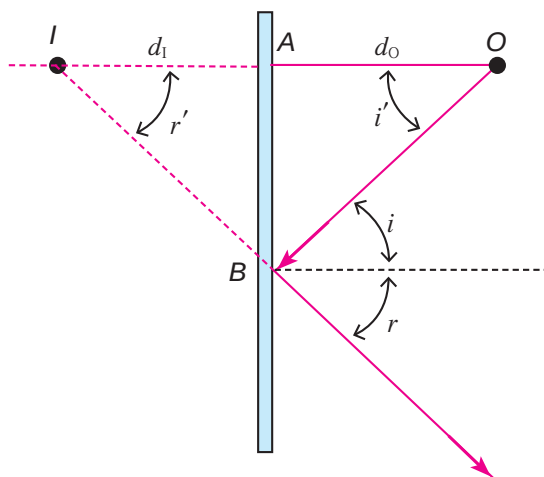


Fig. 4.7. En un espejo plano la distancia de la imagen al espejo es igual a la distancia del objeto al espejo.

el haz parece provenir del punto I . Debido a esto, se produce la sensación de que el objeto está situado en ese punto.

Lo que vemos en I se denomina **imagen del objeto**, pero puesto que en ese punto realmente no hay tal imagen, se dice que es una **imagen virtual**.

Nota que la imagen virtual se forma en la **intersección de las prolongaciones** de los rayos reflejados.

Si entre la infinidad de posibles haces que divergen de O escogemos uno que tenga un borde perpendicular al espejo (Fig. 4.7), entonces podemos encontrar fácilmente cómo se relaciona la distancia de la imagen al espejo, d_i , con la distancia del objeto al espejo d_o .

De acuerdo con la segunda ley de la reflexión $r = i$. Por otra parte $i' = i$ y $r' = r$, de donde $i' = r'$. De este modo, los triángulos OAB e IAB tienen sus ángulos iguales y el lado AB común, por lo que son iguales. De ahí que $d_i = d_o$. Esto significa que la imagen se percibe situada a igual distancia del espejo que el objeto.

Por supuesto, los cuerpos habituales no son como el del ejemplo descrito, puntuales. Para construir la imagen de un cuerpo que no es puntual, se le considera formado por infinidad de puntos y se utiliza lo aprendido anteriormente. En el problema resuelto a continuación se muestra cómo hacer esto en un caso simple.



Ejemplo 4.2. En la figura 4.8 se muestra un objeto extenso AB frente a un espejo plano. Determina la imagen que veríamos.

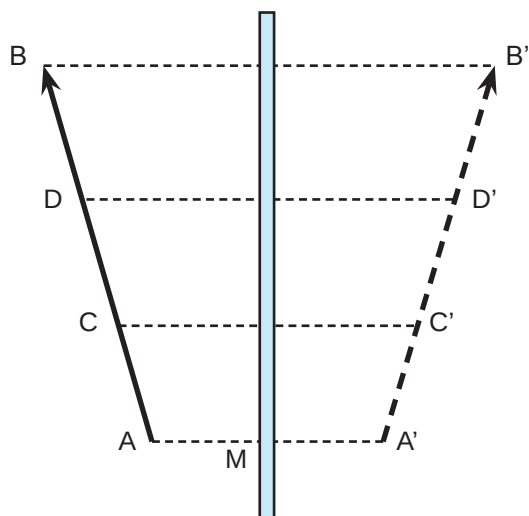


Fig. 4.8. Construcción de la imagen de un objeto extenso, observada mediante un espejo plano.

Consideremos la flecha formada por una serie de puntos, como A, B, C, D. Aplicando a cada uno de ellos la conclusión obtenida anteriormente de que la imagen se aprecia situada a la misma distancia del espejo que el objeto, encontramos los puntos correspondientes A', B', C' y D'. Por lo tanto, la imagen del objeto AB es A'B'. Observa que la imagen es del mismo tamaño que el objeto y simétrica respecto a la superficie del espejo.

4.2. Refracción de la luz

Como ya sabes, cuando un haz de luz incide en la superficie de separación entre dos medios no solo se refleja, una parte de la luz puede ser absorbida, otra reflejada y, si el nuevo medio es transparente, otra parte transmitida con diferente velocidad de propagación, es decir **refractada** (Fig. 4.5). Examinaremos ahora qué relación hay entre la dirección del haz incidente y la del haz refractado, en otras palabras responderemos la pregunta *¿En qué consisten las leyes de la refracción?*

¿Cómo se relaciona la dirección del haz refractado con la del incidente?





¿Cómo depende el ángulo de refracción del ángulo de incidencia?



Willebrord Snell (1580 - 1626). Matemático y astrónomo holandés, quien encontró la ecuación que relaciona los ángulos de incidencia y de refracción. Dicha ecuación lleva su nombre.

4.2.1. Leyes de la refracción

Los ensayos con instalaciones como las de las figuras 4.5 conducen a una primera conclusión relativa a la relación entre la dirección del haz refractado y el incidente, denominada **primera ley de la refracción**. Ella es similar a la encontrada en el caso de la reflexión:

El rayo refractado está en el plano determinado por el rayo incidente y la perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.

Ya vimos cuáles son los denominados ángulos de incidencia y de reflexión. De modo semejante, se llama ángulo de refracción al formado entre el rayo refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia.

Desde principios de nuestra era se disponía de datos de ángulos de incidencia y refracción, pero hallar una ecuación que sintetizara la relación entre dichos ángulos y, por tanto, que permitiera prescindir de tablas con estos datos para diferentes materiales, no fue tarea fácil. Pasó más de un millar de años, hasta que en 1621 el matemático holandés Willebrord Snell (1580-1626) encontró tal ecuación. Años más tarde Descartes la expresó en la forma que hoy la conocemos. Esto representó un notable avance en la óptica geométrica.

Realizando mediciones en la figura 4.5, puedes verificar que para el vidrio de esa figura, cualquiera que sea el ángulo de incidencia se cumple que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = 1.50$$

Si en lugar de vidrio se tratara de agua, se tendría:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = 1.33$$

Se trata de otros materiales, se tienen otros valores, lo cual permite identificar el material a partir del valor de dicho cociente.



Tales cocientes constituyen una medida de cuánto disminuye la velocidad de la luz al pasar del aire a cierto material, una medida de la refracción. Debido a ello se denominan **índice de refracción** del material.

En la tabla 4.1 se muestran los índices de refracción (n) de varios materiales.

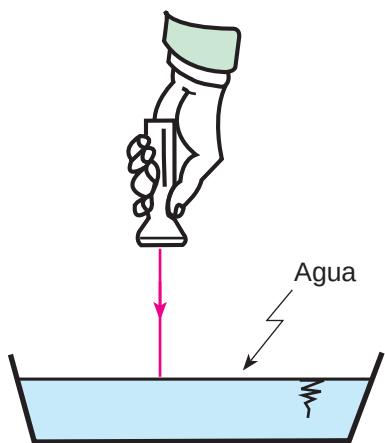
Tabla 4.1. Índices de refracción de diferentes materiales.

Índices de refracción	
Sustancia	n
Vacío	1
Aire	1.0003
Hielo	1.31
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Glicerina	1.47
Vidrio común (soda)	1.52
Saldado	1.53
Cuarzo	1.54
Disulfuro de carbono	1.63
Cristal (ZnO $\cdot$ SiO $_2$)	1.75
Diamante	2.42
Rutilo (TiO $_2$)	2.62

¿A qué conclusión puede llegarse a partir de los resultados obtenidos?

En cada uno de los cuatro casos representados en la figura 4.5, realiza mediciones de los ángulos de incidencia y los correspondientes ángulos de refracción. Construye una tabla con los valores de: i , r , $\sin i$, $\sin r$ y $\sin i / \sin r$.

Un estrecho haz de luz incide perpendicularmente a la superficie de separación entre dos medios transparentes ¿cuál es el ángulo de refracción?





Un estrecho haz de luz llega al agua con un ángulo de incidencia de 30° . Dibuja un esquema de la situación descrita y calcula el ángulo de refracción.



En general, la **ley de Snell** para el paso de la luz del aire a otro material es:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n$$

Esta ecuación también puede expresarse como:

$$\text{sen } i = n \text{sen } r$$

Pero cuando la luz procede de un medio distinto al aire, entonces la ecuación correcta es:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$$

donde n_1 es el índice de refracción del medio desde el cual incide la luz y n_2 el del medio en el que penetra. Ésa es la forma más común de escribir la ley de Snell, o **segunda ley de la refracción**.

Como hemos dicho, cuanto mayor sea la disminución de velocidad de la luz al pasar del aire a determinado medio, tanto mayor será el índice de refracción de éste. Concretamente, si designamos la velocidad de la luz en el vacío –o en el aire, ya que sus valores son muy similares– por c , entonces su velocidad en un medio de índice de refracción n es:

$$v = \frac{c}{n}$$

Esto significa, por ejemplo, que en el agua la velocidad de la luz es 1.33 veces menor que en el vacío, y en el vidrio común alrededor de 1.5 veces menor.

¿Cuál será el valor de la velocidad de la luz en el diamante?





Ejemplo 4.3. Un haz luminoso incide desde el aire sobre cierto cuerpo transparente, formando un ángulo de 30° con la normal a la superficie en el punto de incidencia. Si el ángulo de refracción es 22° : a) ¿cuál es el índice de refracción del cuerpo?, b) ¿cuál es la velocidad de la luz en él?, c) ¿de qué medio podría tratarse?

a) De acuerdo con la ley de Snell:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

En este caso el medio 1 es aire, por lo que $n_1 = 1$. De aquí que:

$$n_2 = \frac{n_1 \sin i}{\sin r} = \frac{(1) \sin 30^\circ}{\sin 22^\circ} = 1.33$$

b) La velocidad de la luz en dicho medio será:

$$v = \frac{c}{n_2} \approx \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.33} = 2.3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Podría tratarse de agua, o algún material con índice de refracción muy similar al de ella.

La figura 4.9 ilustra algunas situaciones de interés relacionadas con la ley de Snell. Si el ángulo de incidencia es 0° , el de refracción también es 0° (Fig. 4.9a). A medida que aumenta el ángulo de incidencia, también aumenta el de refracción (Fig. 4.9a, b y c). Cuando el haz de luz pasa de un medio a otro que tiene mayor índice de refracción (por ejemplo, del aire al agua o al vidrio), su velocidad disminuye y el haz refractado se acerca a la normal a la superficie de separación entre los medios en el punto de incidencia (Fig. 4.9b y c). Y a la inversa, si el haz pasa de un medio a otro con menor índice de refracción (por ejemplo, del agua o vidrio al aire), su velocidad aumenta y el haz refractado se aleja de la normal (Fig. 4.9d). Observa que las trayectorias que determinan los rayos incidente y refractado son las mismas en (c) y en (d), solo que tienen sentido inverso. La refracción también cumple con la **reversibilidad de la trayectoria de la luz**.

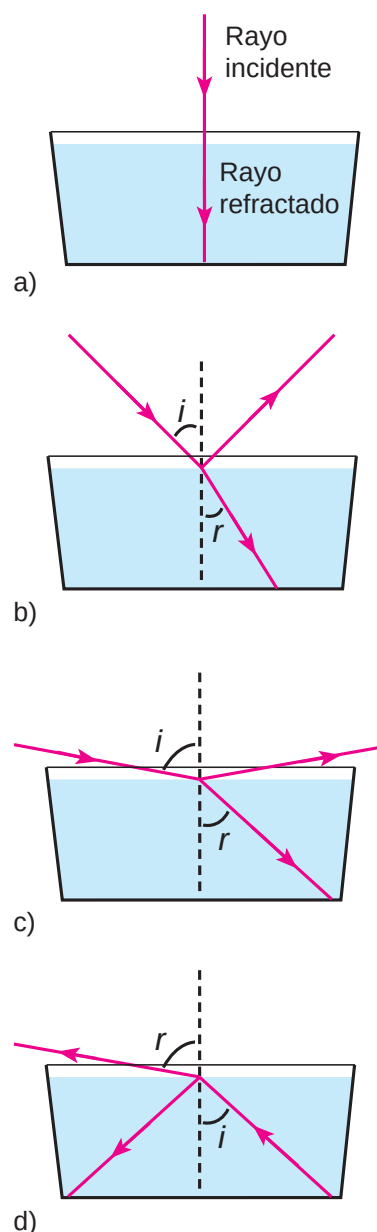


Fig. 4.9. Esquema que ilustra diversas situaciones relacionadas con la ley de Snell.

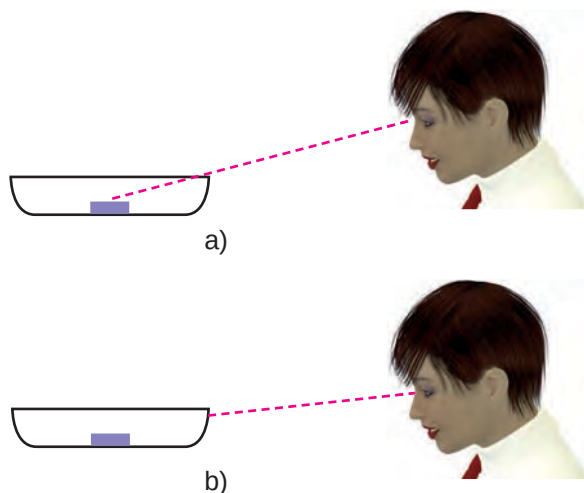


Fig. 4.10. a) Una moneda situada en un platillo es visible. b) Al bajar la cabeza poco a poco, llega un momento en que la moneda deja de verse, pero si se vierte agua en el platillo, vuelve a ser visible.

A continuación responderemos a la pregunta *¿Cómo se explica la formación de ciertas imágenes mediante las leyes de la refracción?*

4.2.2. Imágenes formadas mediante refracción de la luz

Colócate frente a un plato en el cual se ha situado una moneda (Fig. 4.10a). Baja la cabeza poco a poco hasta que la moneda deje de verse (Fig. 4.10b). Si ahora viertes agua en el plato, la moneda se hará visible nuevamente. ¿Cómo se explica esto?

Para responder la pregunta anterior procederemos de modo similar que al interpretar la formación de imágenes mediante espejos: trazaremos la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto.

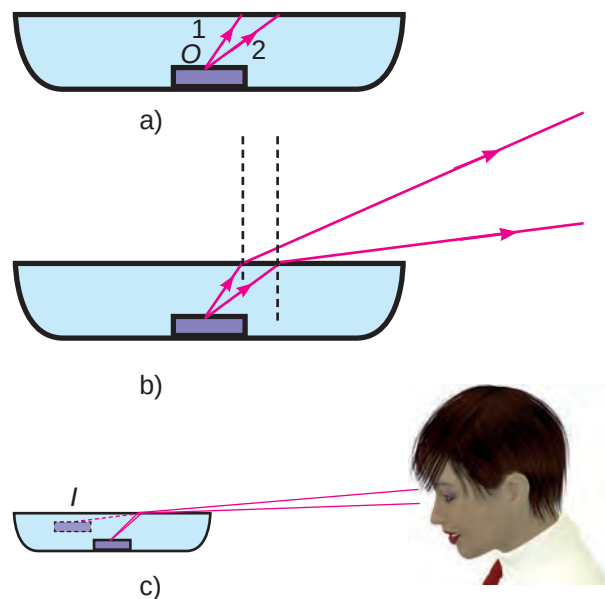


Fig. 4.11. Representación esquemática (no a escala) que ayuda a comprender el aparente cambio de posición de una moneda al verter agua en el plato en que se encuentra.

En la figura 4.11a se ha representado un haz que diverge del punto O de la moneda. Tracemos las líneas perpendiculares a la superficie del agua en los puntos de incidencia de los rayos 1 y 2 (Fig. 4.11b). Como la luz pasa del agua al aire, los rayos refractados deben alejarse de las líneas perpendiculares que hemos trazado. Al colocar el ojo como se muestra en la figura 4.11c, sobre él incide un haz de luz divergente. El ojo percibe este haz como procedente del punto I , produciéndose así la sensación de que la moneda se encuentra en ese lugar. Ésta es una **imagen virtual**, similar a las formadas mediante espejos planos, se forma en la intersección de **las prolongaciones** de los rayos refractados.

La aparente disminución de la profundidad de un recipiente al verter agua en él, también se debe a la refracción de la luz, cuando procedente de su fondo pasa al aire.



4.2.3. Reflexión total interna

Si en la situación representada en la figura 4.12a continuamos aumentando el ángulo de incidencia, pronto el ángulo de refracción será 90° . ¿Qué sucederá con el rayo refractado si aumentamos todavía más el ángulo de incidencia? ¿Desaparecerá? ¿Aparecerá otro rayo en el interior del cuerpo, además del reflejado? El experimento de la figura 4.12b conduce a la respuesta. Una serie de haces de luz que penetran desde la izquierda en un prisma y, luego de atravesarlo e incidir en su superficie superior, dan lugar a haces que salen nuevamente al aire. Observa, sin embargo, cómo los dos haces del extremo derecho no originan haces refractados. Los haces que en los casos de la parte izquierda emergían del prisma ahora han desaparecido y en el interior, aparte de los reflejados, no aparecen otros haces. Pero fíjate que la intensidad de los haces reflejados ahora es mayor que en los casos de la parte izquierda.

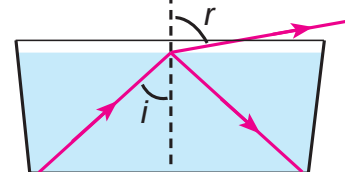


Fig. 4.12a. Esquema que ilustra a un haz que pasa de un medio a otro con menor índice de refracción.



Fig. 4.12b. Haces luminosos procedentes de la izquierda que inciden en un prisma. Los dos del extremo derecho no dan lugar a haces refractados, sino solo reflejados, cuya intensidad aumenta.

Este fenómeno, en el cual la luz incide en la superficie de separación entre dos medios transparentes y no da lugar a refracción, se denomina *reflexión total interna* y el ángulo de incidencia a partir del cual tiene lugar, *ángulo límite*, o *crítico*.

Nota que, a diferencia de la 2ª ley de la reflexión, **en la 2ª ley de la refracción los valores de i y r no siempre pueden variar en el intervalo $0^\circ - 90^\circ$.** Cuando la luz pasa de cierto medio a otro de mayor índice de refracción (por ejemplo, del aire al vidrio), i puede variar entre 0° y 90° , mientras que r lo hace en un intervalo menor. Por su parte, si la luz se transmite a un medio de menor índice de refracción (por ejemplo, del vidrio al aire), entonces,

Argumenta desde el punto de vista de la energía por qué es comprensible que al ocurrir la reflexión total interna aumente la intensidad luminosa del haz reflejado.





Da alguna razón para que el fenómeno de la “reflexión total interna” se haya denominado de ese modo.



Fig. 4.13. Esquema de la reflexión total interna en una fibra óptica.

a partir de cierto valor de i (ángulo límite o crítico), deja de tener lugar el paso de la luz a dicho medio, o sea, no hay refracción y, por tanto, pierde sentido la ley de Snell.

La reflexión total interna de la luz solo ocurre cuando ésta incide sobre la superficie de separación entre dos medios, procedente del medio de mayor índice de refracción.

El ángulo límite correspondiente a la refracción de la luz al pasar de cierto medio a otro puede ser determinado a partir de la ley de Snell. Dado que el ángulo de refracción que corresponde al ángulo límite θ_L es 90° , se tiene:

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ$$

y como $\sin 90^\circ = 1$, queda

$$n_1 \sin \theta_L = n_2$$

De aquí que $\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1}$, por tanto

$$\theta_L = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Un sencillo cálculo muestra que el ángulo límite para el fenómeno de la refracción al pasar la luz del agua ($n_1 = 1.33$) al aire ($n_2 = 1$) es $\theta_L \approx 48.8^\circ$. ¡Compruébalo sustituyendo los datos en la ecuación! Esto significa que para valores del ángulo de incidencia mayores que éste, no tiene lugar el fenómeno de la refracción, y todo el haz de luz es reflejado.

La reflexión total interna de la luz es utilizada en la construcción de las denominadas **fibras ópticas** (conductores de luz), las cuales han encontrado gran aplicación en muchas técnicas médicas y en las comunicaciones. El esquema de la figura 4.13 ilustra el principio en que se basa la conducción de la luz en una fibra óptica. Por uno de los extremos de un finísimo tubo de un material muy transparente, que apenas absorbe la luz, entra un haz luminoso y luego de múltiples reflexiones internas sale por el otro extremo. En el dibujo se ha exagerado el diámetro del fino tubo a fin de ilustrar



las diversas reflexiones que tienen lugar en su interior, el grueso de una fibra óptica habitual es similar al de un cabello (Fig. 4.14).

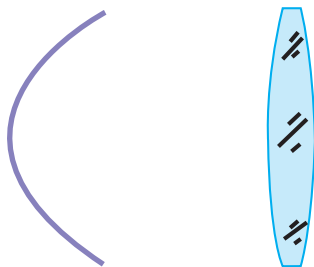
Indaga, por ejemplo en una enciclopedia, acerca de las aplicaciones de las fibras ópticas en medicina y en las comunicaciones.



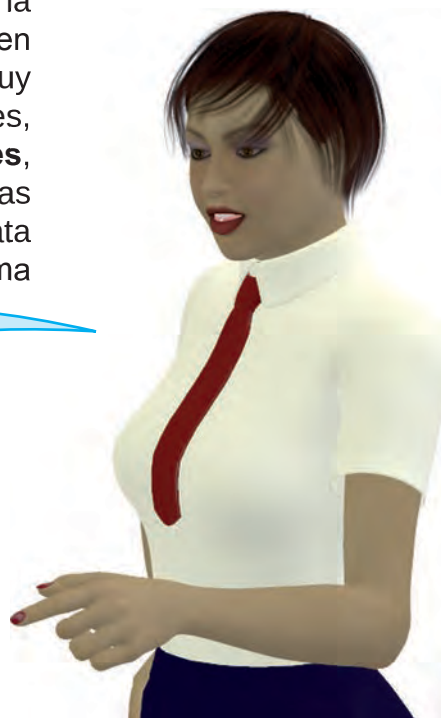
Fig. 4.14. El diámetro de una fibra óptica habitual es similar al de un cabello humano.

4.3. Lentes y espejos esféricos

En la mayoría de los dispositivos ópticos (lupas, microscopios, proyectores, cámaras fotográficas, telescopios y otros muchos) se utilizan **lentes** y ciertos **espejos curvos**. Aunque es posible emplear las leyes de la reflexión y la refracción para trazar la trayectoria que siguen los haces luminosos al incidir sobre ellos, esto resulta muy engorroso. Por suerte, en muchos de estos espejos y lentes, ciertos rayos, denominados **característicos**, o **notables**, siguen trayectorias peculiares, las que han sido resumidas en unas pocas reglas, fáciles de recordar y utilizar. Se trata de lentes y espejos cuyas superficies tienen una forma esférica o próxima a ella.



Intenta trazar la trayectoria que sigue un haz luminoso al incidir sobre el espejo curvo de la figura. Repite la operación para el caso de la lente. ¿Es cómodo trazar la trayectoria de los rayos utilizando las leyes de la reflexión y la refracción?



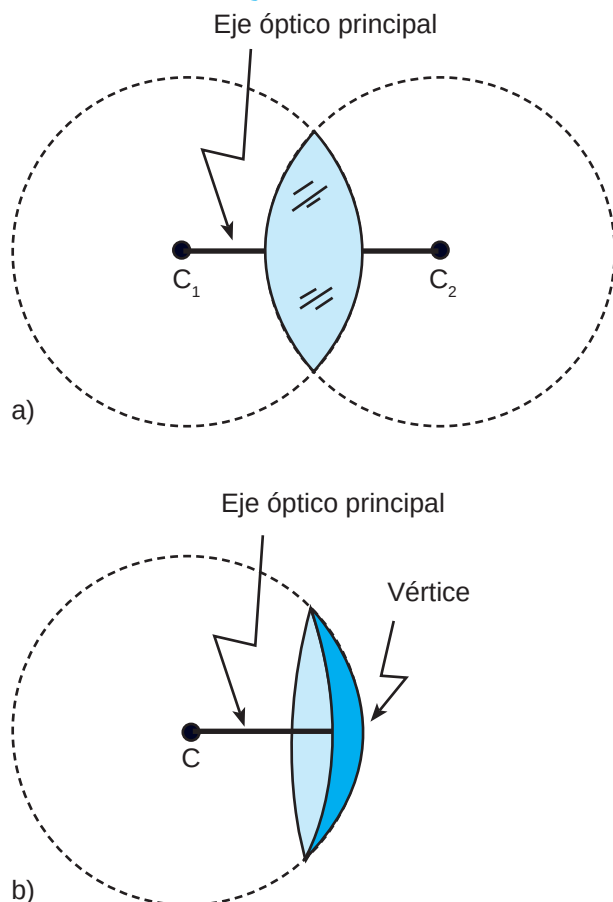


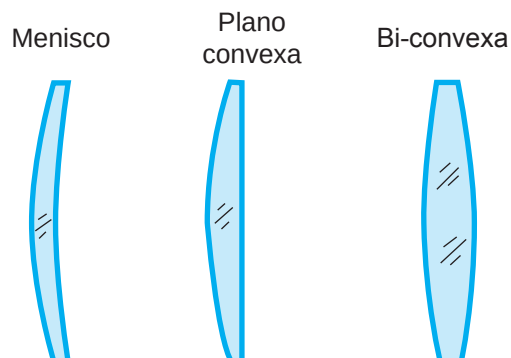
Fig. 4.15. Esferas a las que pertenecen las superficies de: a) una lente, b) un espejo.

4.3.1. Tipos de lentes y espejos esféricos

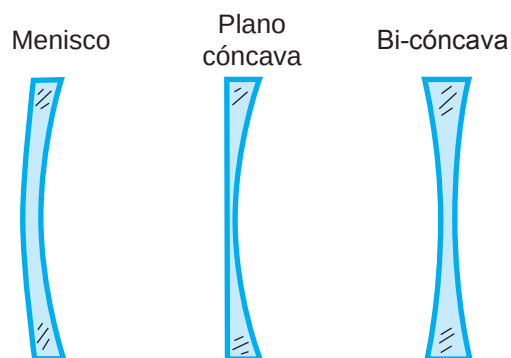
En la figura 4.15 se han representado las esferas a las cuales pertenecen las superficies de una lente y de un espejo esféricos. En las lentes, a la línea imaginaria que pasa por los centros de las esferas a las cuales pertenecen sus superficies se le llama **eje óptico principal**. En los espejos, se denomina así a la línea que pasa por su vértice y el centro de la esfera.

Las primeras lentes fueron esferas de vidrio llenas de agua. Eran empleadas en la antigüedad para encender fuego. Actualmente se construye una gran variedad de lentes esféricas, principalmente de vidrio y plástico. Ellas pueden ser **convergentes** o **divergentes**. Estos nombres se deben a que los rayos luminosos paralelos, por ejemplo los solares, cuando atraviesan las primeras convergen, mientras que cuando atraviesan las segundas divergen. Cuando la superficie de una lente está en contacto con el aire, como es habitual, es posible distinguir con facilidad si es convergente o divergente: si la zona central es más gruesa que los extremos, la lente es convergente y, por el contrario, si es más estrecha, divergente. En la figura 4.16 se han representado algunos tipos de lentes. Las de la parte superior son convergentes y las de la inferior, divergentes. Pueden ser simétricas o no.

Los espejos esféricos pueden ser **cóncavos** o **convexos**. Se denomina cóncavo si la parte reflectora de la superficie esférica es la interna (Fig. 4.17a) y convexo, si es la externa (Fig. 4.17b). Los espejos cóncavos también pudieran denominarse **convergentes** y los convexos, **divergentes**, porque los rayos luminosos paralelos que se reflejan en los primeros convergen y los que se reflejan en los segundos divergen.



Lentes convergentes



Lentes divergentes

Fig. 4.16. Esquemas de lentes.

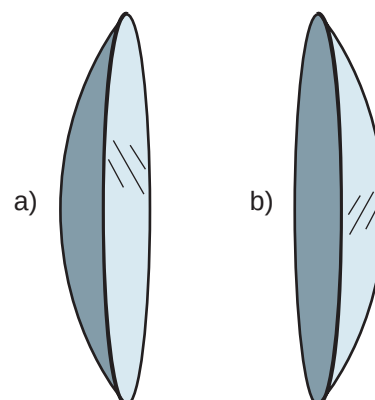


Fig. 4.17. Espejos esféricos: a) cóncavo, b) convexo.

Una cuchara pulida pudiera funcionar como un espejo. ¿Cuál de sus caras lo haría como un espejo cóncavo y cuál como convexo?



Comprueba qué tipo de lente, convergente o divergente, es el utilizado en: a) una lupa, b) los anteojos de algunas de las personas con las que te relacionas.



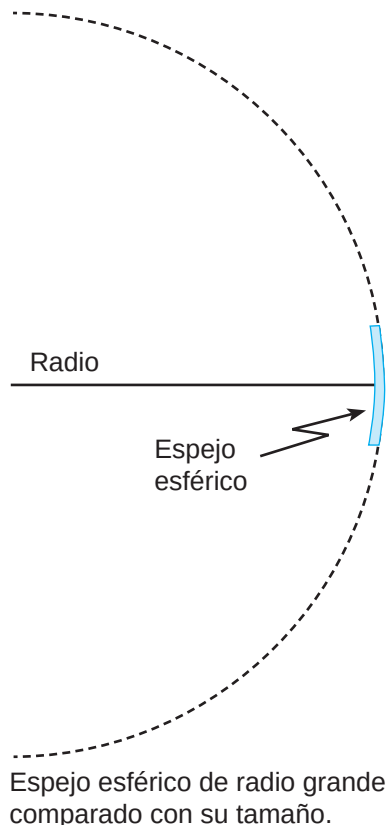


4.3.2. Rayos principales en lentes y espejos esféricos

En este apartado intentaremos responder a la pregunta:

¿Qué trayectoria siguen los rayos al incidir en lentes y espejos esféricos?

Estudiaremos la trayectoria que siguen solo ciertos rayos característicos, denominados **rayos principales**, o notables. Nos limitaremos al caso de **lentes convergentes simétricas** y de **espejos cóncavos** (¿A cuáles de los esquemas de las figuras 4.16 y 4.17 corresponden tales lentes y espejos?). Por otra parte, cabe advertir que algunas de las regularidades que a continuación describiremos son en realidad aproximadas. No obstante, se cumplen con gran exactitud para lentes y espejos esféricos de radios grandes comparados con el tamaño de la lente (lente “delgada”), o del espejo.



1. Los rayos que inciden paralelamente al eje óptico principal de la lente o espejo, convergen en un punto situado sobre dicho eje (Fig. 4.18a y b).

Esta propiedad se tiene en cuenta, al emplear lentes y espejos esféricos con el propósito de concentrar la luz procedente de determinadas fuentes, por ejemplo del Sol, las estrellas, etc.

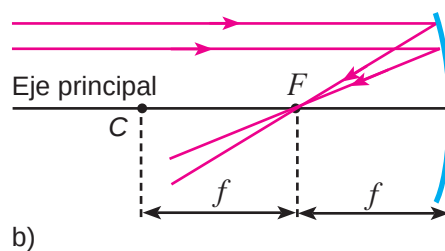
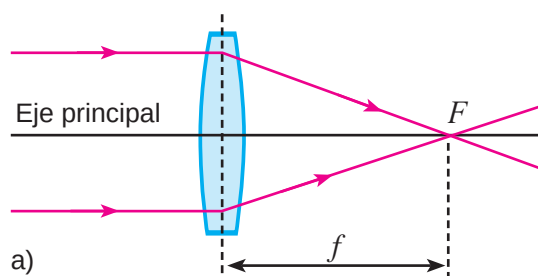


Fig. 4.18. Trayectoria de los rayos que inciden paralelamente al eje óptico de: a) una lente esférica, b) un espejo esférico.

El punto en el cual convergen los rayos paralelos al eje óptico se denomina **foco principal** (F) y la distancia que hay entre él y la lente o el espejo, **distancia focal** (f).



Puede demostrarse que, en los espejos esféricos que estamos considerando, el foco principal se encuentra aproximadamente en el punto medio entre el centro de la superficie esférica y el vértice del espejo (Fig. 4.18b). Ello posibilita ubicar fácilmente el foco en el esquema de un espejo esférico.

Entre la capacidad de una lente para hacer converger la luz y su distancia focal, existe una relación inversa. Por eso, se llama **poder convergente** de una lente al inverso de su distancia focal. Cuando la distancia focal se expresa en metros, el poder convergente se obtiene directamente en **dioptrías**. Así, una lente para corregir la visión de 50 cm de distancia focal, posee un poder convergente de:

$$\frac{1}{0.50 \text{ m}} = 2.0 \text{ dioptrías.}$$

2. Los rayos que pasan por el foco, o que parten de él, después de incidir sobre la lente o espejo se propagan paralelamente al eje óptico principal (Fig. 4.19a y b).

Esta propiedad era de esperarse, pues se refiere a un recorrido del rayo de luz inverso al descrito en el punto anterior y otras veces ya hemos encontrado que se cumple la reversibilidad de la trayectoria de la luz. Se utiliza esta propiedad en la construcción de muchos proyectores de luz (faros de navegación, faros de automóviles, proyectores de diapositivas, etc.).

Toma una lente convergente (sirven una lupa y algunas lentes para corregir la visión) y ensaya la concentración de luz solar mediante ella. Determina, aproximadamente, la distancia focal de la lente. Si la lente es relativamente grande y su distancia focal pequeña, entonces tal vez puedas encender un pedazo de papel con ella.

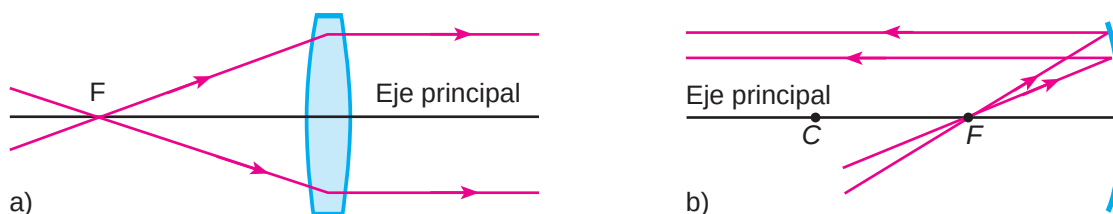


Fig. 4.19. Trayectoria de los rayos que pasan por el foco de: a) una lente, b) un espejo esférico.

3. Los rayos que inciden en el centro de la lente (Fig. 4.20a), y en el caso del espejo los que inciden sobre él después de pasar por el centro de su superficie esférica (Fig. 4.20b), no cambian de dirección.

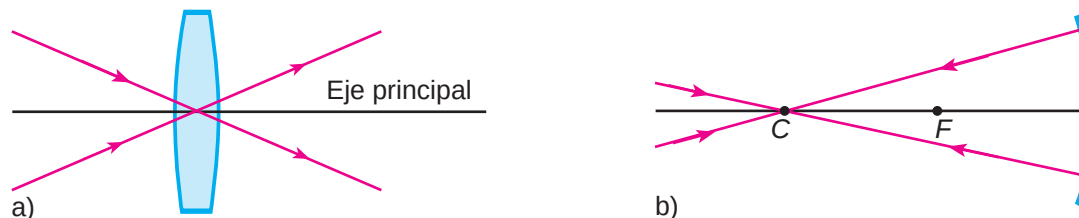


Fig. 4.20. Trayectoria de los rayos que: a) inciden en el centro de la lente, b) pasan por el centro de la superficie esférica a que pertenece el espejo.

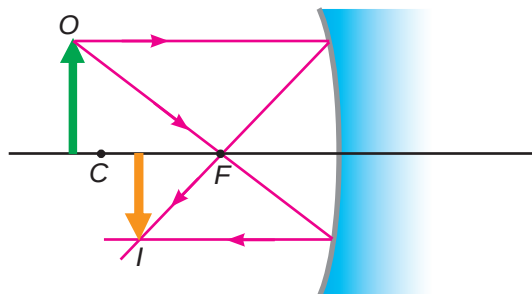
De acuerdo con la segunda ley de la refracción, los rayos que inciden sobre la superficie de la lente representada en la figura 4.19a deben desviarse al pasar del aire al vidrio. ¿Por qué entonces en el texto se afirma que dichos rayos no cambian de dirección al atravesar la lente?

Justifica a partir de la segunda ley de la reflexión, la trayectoria que siguen los rayos en la figura 4.19b, luego de reflejarse en el espejo.

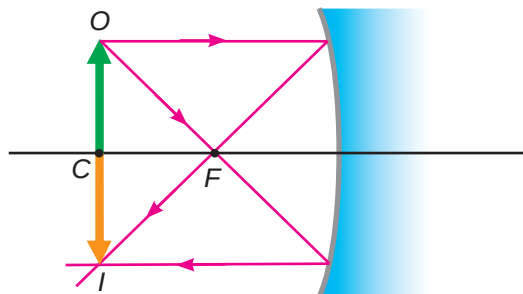
Determina, aproximadamente, las dioptrías de unas lentes utilizadas para corregir la visión y compara el valor obtenido con el previsto.



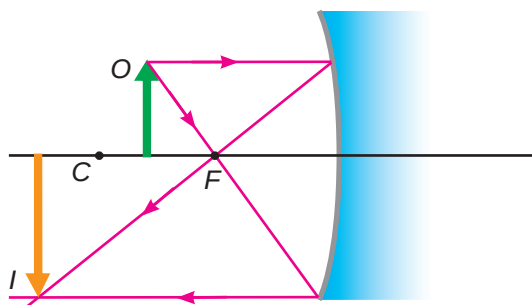
Posición de la imagen en relación al objeto en un espejo cóncavo.



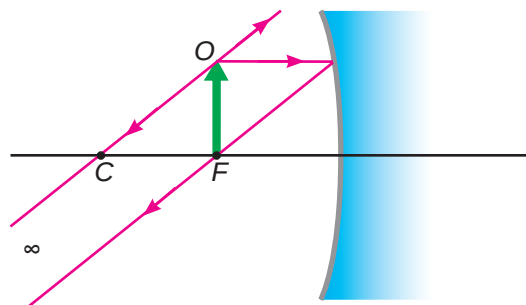
1. Objeto situado a una distancia mayor del centro de curvatura. La imagen es real, invertida y situada entre el centro y el foco. Su tamaño es menor que el objeto.



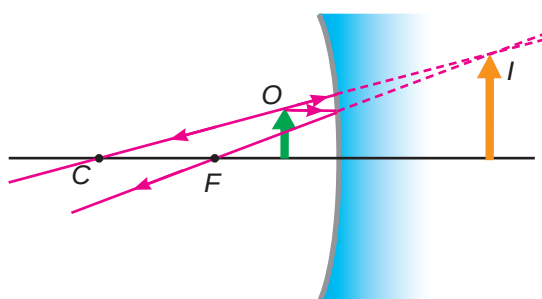
2. Objeto situado en el centro de curvatura. La imagen es real, invertida y situada en el mismo punto. Su tamaño igual que el objeto.



3. Objeto situado entre el centro de curvatura y el foco. La imagen es real, invertida y situada a la izquierda del centro de curvatura. Su tamaño es mayor que el objeto.



4. Objeto situado en el foco del espejo. Los rayos reflejados son paralelos y la imagen se forma en el infinito.



5. Objeto situado entre el foco y el vértice del espejo. La imagen es virtual, y conserva su orientación. Su tamaño es mayor que el del objeto.

4.4. Formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos

En este apartado consideraremos dos cuestiones clave: *¿Cómo se explica la formación de imágenes mediante lentes y espejos esféricos?* y *¿Cuál es el principio de funcionamiento óptico del ojo humano y de instrumentos como la lupa, el microscopio y el telescopio?* Las abordaremos simultáneamente, pues están estrechamente relacionadas: la función del ojo y de los instrumentos mencionados es, precisamente, la formación de imágenes.



Lente convergente

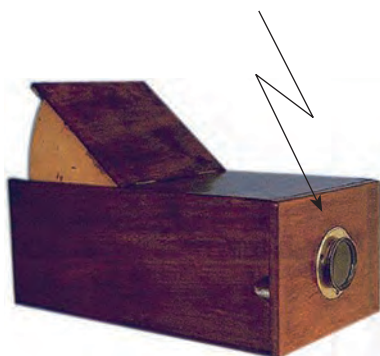


Fig. 4.21. Cámara oscura construida en el siglo XIX, la cual utiliza una lente convergente.

¿Cómo ocurre la formación de la imagen por medio de la lente?



4.4.1. Formación de imágenes mediante lentes convergentes

4.4.1.1. La cámara fotográfica

Antecesora de la cámara fotográfica fue la **cámara oscura**, con la cual ya te familiarizaste. Si con el propósito de aumentar la cantidad de luz que penetra en una cámara oscura, su pequeño orificio se hace más y más grande, pronto la imagen se torna borrosa (Intenta explicar por qué). Sin embargo, si en el lugar del orificio situamos una lente convergente (Fig. 4.21), y el fondo de la cámara está a la distancia requerida de ella, lograremos aumentar la cantidad de luz que penetra en la cámara y, al propio tiempo, obtener una imagen nítida del objeto. Al colocar una película fotográfica en el fondo de la cámara se tiene ya un modelo de la primera cámara fotográfica.

A fin de facilitar el análisis, consideraremos un objeto muy simple, digamos, uno que tiene forma de flecha. En la figura 4.22 se ha representado la flecha y, a su derecha y alejada de ella, una lente convergente. Examinemos, como en ocasiones anteriores, la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto, digamos, de la punta de la flecha (O) e incide sobre la lente. El haz puede ser cualquiera que parta de O y llegue a la lente, sin embargo, ya que conocemos la trayectoria que siguen los **rayos principales**, escojamos uno cuyos bordes sean dos de estos rayos, por ejemplo, el 1, que incide paralelamente

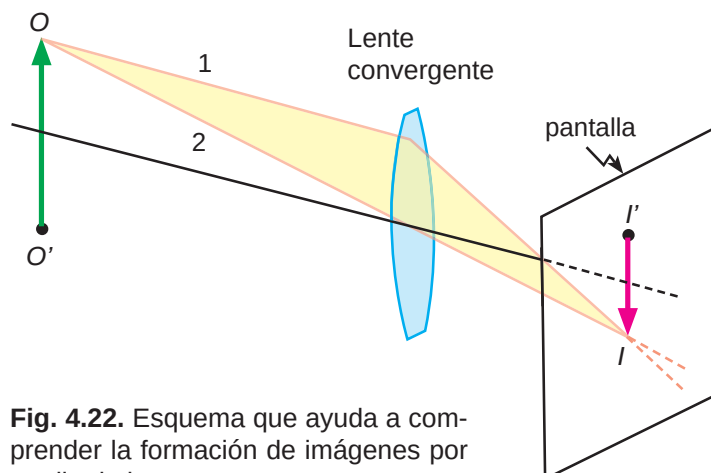


Fig. 4.22. Esquema que ayuda a comprender la formación de imágenes por medio de lentes convergentes.



al eje óptico de la lente y el 2, que pasa por su centro. Estos rayos se cortan en el punto I . Insistimos, hemos seleccionado dos **rayos principales** porque conocemos de antemano la trayectoria que seguirán, pero cualquier otro haz divergente que parta de O y atraviese la lente, también convergerá en el punto I . De este modo, en el punto I se forma una imagen de la punta de la flecha.

Puedes comprobar por tí mismo que dos rayos principales que partan del punto O' , convergen en el punto I' . Ello significa que la imagen del otro extremo de la flecha se forma en I' . Nota que la imagen es invertida y real, no virtual. La imagen es real porque se forma en la intersección de los rayos refractados, sin necesidad de realizar sus prolongaciones.

Si en I' se coloca una pantalla, la imagen podrá verse con nitidez. Al variar la distancia entre el objeto y la lente, también varía el lugar donde se forma la imagen. Por eso, para que se forme nítidamente se precisa que la distancia entre la lente y la pantalla sea la requerida. Esto puede lograrse desplazando la pantalla, o la lente.

En la cámara fotográfica la película sensible actúa como pantalla donde se forma la imagen y la lente es la que se acerca o aleja de ella para lograr una imagen nítida.

Las cámaras fotográficas actuales poseen numerosos aditamentos, que permiten tomar fotografías de gran calidad, en particular no utilizan una sola lente para formar las imágenes en la película, sino un sistema de ellas, denominado **objetivo**. Sin embargo, este actúa como una lente convergente.

En el caso de la cámara fotográfica, la imagen formada por la lente es de menor tamaño que el objeto. Pero las lentes convergentes también pueden formar imágenes mayores que el objeto, ello depende de la distancia a que este se encuentra de la lente. A medida que el objeto se desplaza hacia el foco de la lente, el tamaño de la imagen crece, y cuando está situado a una distancia $2f$ de ella, es igual al del objeto. Para posiciones del objeto próximas al foco de la lente, la imagen es muy grande (Fig. 4.23).

Profundiza acerca de la fotografía en una enciclopedia: su origen, importancia, tipos de cámaras, funcionamiento de una cámara común.



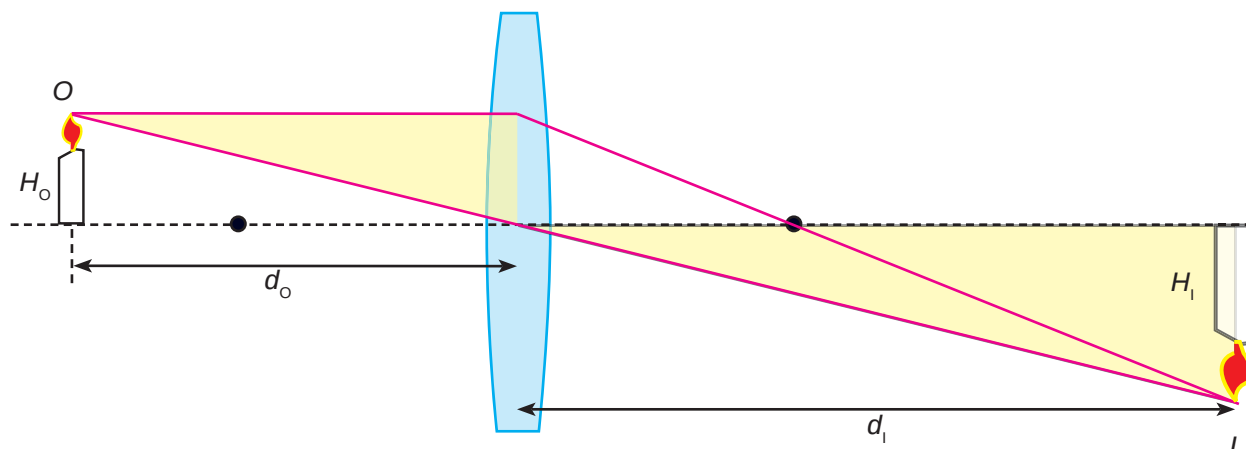


Fig. 4.23. Formación de una imagen real aumentada, por medio de una lente convergente.

Realizando mediciones en la figura 4.23, comprueba que el aumento lineal de la vela puede ser calculado como $A = d_i/d_o$.

Se denomina **aumento lineal**, o ampliación, al cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto. Así, si designamos por H_i el tamaño de la imagen y por H_o el del objeto, el aumento lineal es:

$$A = \frac{H_i}{H_o}$$

El “aumento” producido en una cámara fotográfica es menor que la unidad, porque la imagen es de menor tamaño que el objeto. En cambio, el de la lente objetivo de un microscopio común puede ser de decenas de veces mayor.

La geometría de la figura 4.23 esclarece la relación que hay entre el aumento y las distancias del objeto, d_o , y la imagen, d_i , a la lente. Los triángulos que se han sombreado a la izquierda y a la derecha de la lente, son semejantes (¿Por qué?). De ahí que:

$$A = \frac{H_i}{H_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

Toma una lente convergente (pueden servir una lupa y algunas lentes de corregir la visión, etc.) y averigua, o determina, su distancia focal. Ensaya la formación de imágenes de diversos objetos: una lámpara, una ventana, algún objeto bien iluminado, etc. Como pantalla puedes utilizar algún material traslúcido o, simplemente, una hoja de papel blanco. Estudia lo que sucede con la imagen al variar las distancias entre el objeto, la lente y la pantalla y trata de explicar los resultados mediante un esquema de la situación y el trazado de rayos principales. Resume tus conclusiones.





4.4.1.2. El ojo humano

Tiene la forma de un globo aproximadamente esférico, de diámetro 2.3-2.5 cm (Fig. 4.24). Los medios transparentes que lo constituyen (córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo) actúan, en conjunto, como una lente convergente de 1.7 cm de distancia focal, aproximadamente. La luz penetra en el ojo por la pupila, la cual es una abertura que hay en el iris. Mientras menor sea la iluminación de los objetos que observamos, mayor será la abertura de la pupila. Este mecanismo de regulación se realiza automáticamente, sin que seamos conscientes de ello. El cristalino funciona como una lente. En la retina, la cual constituye una especie de pantalla, se forma una imagen invertida del objeto que miramos. La sensación visual se produce cuando la luz incide en las terminaciones nerviosas de la retina.

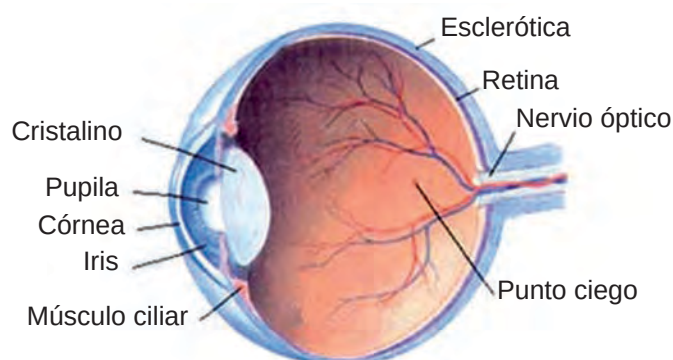


Fig. 4.24. Representación esquemática del interior del ojo humano.

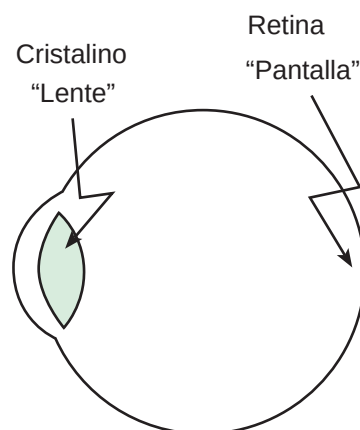


Fig. 4.25. Representación esquemática del ojo humano desde el punto de vista óptico.

Desde el punto de vista óptico, el ojo humano puede representarse como en el esquema de la figura 4.25. La distancia entre la “lente” y la “pantalla” es fija y no varía al mirar objetos lejanos o cercanos. ¿Cómo es posible, entonces, que se logre formar una imagen nítida del objeto que miramos, para distancias muy diferentes entre él y el ojo?

Compara entre sí la formación de imágenes en una cámara fotográfica y en la retina del ojo humano.





Cuando un adulto con visión normal acerca mucho un objeto a sus ojos, lo ve “desenfocado”. ¿Cómo se explica esto? ¿Por qué, a medida que aumenta la edad, muchas personas tienden a alejar los objetos para poder verlos bien, o de lo contrario utilizan lentes?



En los miopes, la imagen nítida de los objetos alejados se forma delante de la retina del ojo; en los hipermetrópicas se formaría fuera del globo del ojo, detrás de la retina. Para corregir estos defectos se utilizan, respectivamente, lentes divergentes y convergentes. Explica el papel de dichas lentes.

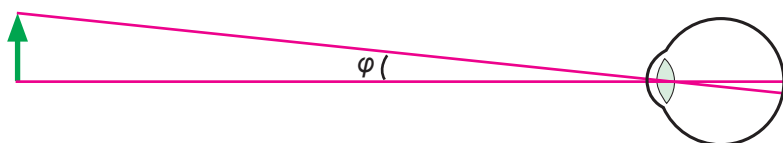
A medida que acercamos el objeto que miramos al ojo, mediante un acto reflejo (involuntario), los músculos ciliares se contraen y aumenta la curvatura del cristalino, haciendo que la “lente” sea más convergente. De otro modo veríamos el objeto desenfocado, pues su imagen nítida se formaría en un lugar más allá de la retina. Este proceso se denomina **acomodamiento del ojo**, y explica por qué no es posible ver con nitidez objetos cercanos y lejanos simultáneamente. Un niño con visión normal puede enfocar bien a una distancia tan corta como 7 - 8 cm, pero al aumentar la edad de la persona, el cristalino se va endureciendo y las posibilidades de visión cercana disminuyen, lo cual debe ser corregido con ayuda de lentes. Como promedio, la distancia mínima a que un adulto con visión normal puede enfocar sin dificultad es 25 cm. Esta distancia suele denominarse “punto cercano”.

La experiencia muestra que mientras mayor sea la distancia desde la cual observamos un objeto, menores parecen sus dimensiones y peor vemos sus detalles. ¿Cómo se explica esto?

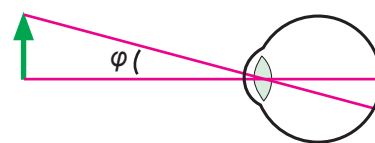
El tamaño aparente de un objeto y la visibilidad de sus detalles están determinados por el tamaño de su imagen en la retina del ojo.

En la figura 4.26 se representa un mismo objeto, pero situado a diferentes distancias del ojo. En el caso (b) el objeto parece mayor, porque la imagen que se forma en la retina también es mayor. Por otra parte, mientras más amplia sea esta imagen, mayor será el número de terminaciones nerviosas de la retina que participa en la sensación visual y, por eso, mejor se verán los detalles. A medida que disminuye el tamaño de la imagen en la retina, van desapareciendo los detalles que distinguimos.

El tamaño de la imagen de un objeto en la retina del ojo depende del ángulo bajo el cual se observa el objeto, dicho ángulo crece según el objeto se acerca al ojo.



a)



b)

Fig. 4.26. El tamaño aparente de un mismo objeto es mayor en (b) que en (a), porque el ángulo φ bajo el cual se observa y, por tanto, su tamaño en la retina del ojo, es mayor.

De acuerdo con el análisis realizado, para ver mejor los detalles de un objeto podemos acercarlo al ojo, a fin de aumentar el ángulo bajo el cual lo vemos, y el tamaño de su imagen en la retina. Sin embargo, no siempre es posible acercar los objetos que observamos, como por ejemplo, en el caso de los astros o de la cima de una montaña. Por otra parte, aún en aquellos casos en que es posible, el acercamiento está limitado por la capacidad de acomodamiento del ojo para enfocar una imagen nítida en la retina. Como hemos dicho, en una persona adulta con visión normal, la distancia mínima a que el ojo puede realizar el acomodamiento de forma natural, llamada “mínima distancia de visión distinta” o “punto cercano” es, como promedio, de unos 25 cm.

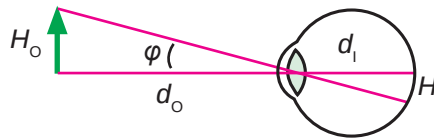
Con el propósito de resolver las dificultades mencionadas, se emplean ciertos instrumentos ópticos, como la lupa, el microscopio y el telescopio, cuyo funcionamiento examinamos en los apartados que siguen.

Sostén una moneda lo más alejada que puedas de tus ojos. Acércala poco a poco y observa cómo cada vez se ven mejor sus detalles. ¿Cuál es la distancia mínima a que puedes enfocar?





Ejemplo 4.4. Determina el ángulo bajo el cual se observa una regla de 1.00 m de alto y el tamaño que tendrá su imagen en la retina del ojo, cuando se encuentra a una distancia de: a) 10.0 m, b) 20.0 m. Considera que la distancia entre la “lente” del ojo y la retina es de unos 2.0 cm.



a) De acuerdo con la figura, la tangente del ángulo bajo el cual se observa la regla es:

$$\tan \varphi = \frac{H_o}{d_o},$$

donde H_o es la altura de la regla y d_o su distancia al ojo. Por consiguiente:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{1.00 \text{ m}}{10.0 \text{ m}}\right) = 5.71^\circ$$

Para los triángulos exterior e interior al ojo de la figura se tiene:

$$\frac{H_i}{H_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

donde H_i es el tamaño de la imagen en la retina y d_i la distancia entre la “lente” del ojo y la retina. Por lo tanto, el tamaño de la imagen en la retina es:

$$H_i = \frac{H_o}{d_o} d_i = \left(\frac{1.00 \text{ m}}{10.0 \text{ m}}\right)(0.02 \text{ m}) = 2.0 \text{ mm}$$

$$\text{b) } \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{1.00 \text{ m}}{20.0 \text{ m}}\right) = 2.86^\circ$$

y

$$H_i = \left(\frac{1.00 \text{ m}}{20.0 \text{ m}}\right)(0.02 \text{ m}) = 1.0 \text{ mm}$$

En la figura 4.26a la distancia a que está la regla es el doble que en la 4.26b y el ángulo de observación la mitad. Esta relación de proporcionalidad inversa entre el ángulo bajo el cual se ve el objeto y la distancia a que se encuentra tiene lugar cuando los ángulos de observación son pequeños, como generalmente ocurre en la práctica. En efecto, en tal caso el ángulo expresado en radianes es $\varphi \approx H_o/d_o$, donde se aprecia la mencionada relación de proporcionalidad inversa.



4.4.1.3. La lupa

Denominada también **microscopio simple**, en su variante más elemental consiste solamente en una lente convergente, a veces llamada **lente de aumento**.

En la figura 4.27a se ha representado un objeto (una flecha) a una distancia del ojo mucho menor de 25 cm. Como ya sabemos, a esa distancia el ojo adulto normal tiene dificultad para acomodar, por lo que el objeto se verá “desenfocado”.

En esas condiciones, intercalemos una lupa entre el objeto y el ojo, de tal modo que el objeto quede entre la lente y su foco (Fig. 4.27b). El esquema muestra un haz de luz que diverge de la punta de la flecha. A fin de trazar con facilidad la trayectoria del haz, lo hemos escogido de tal modo que sus bordes sean dos rayos principales: el que incide paralelo al eje óptico de la lente y el que pasa por su centro. El esquema muestra que los haces que llegan al ojo parecen provenir de un objeto como el I , originándose por eso la **imagen virtual** de que la flecha se encuentra en ese lugar.

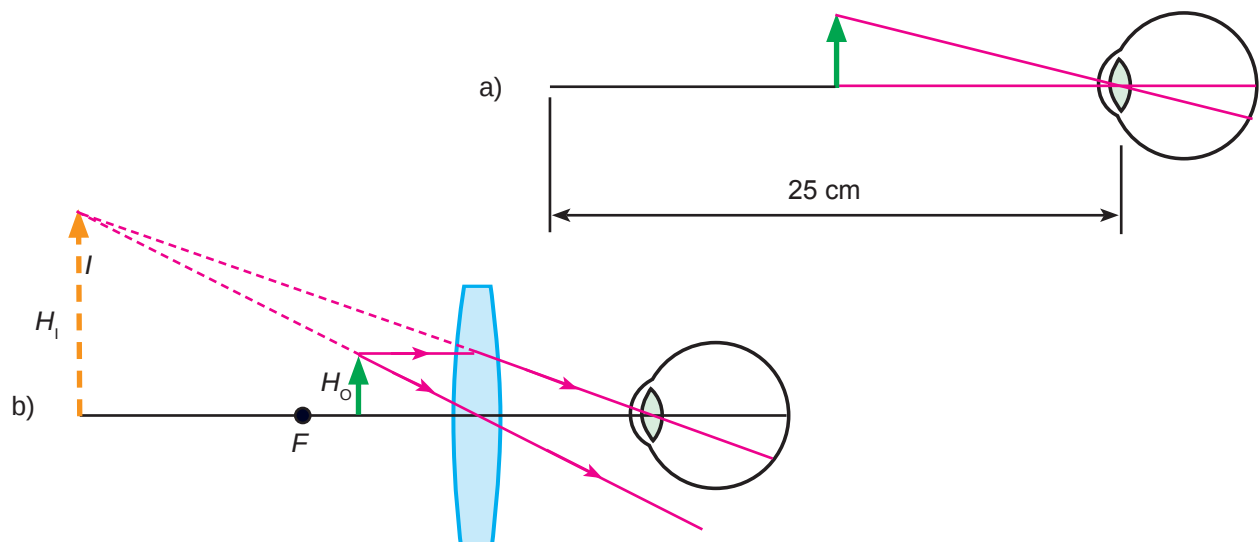
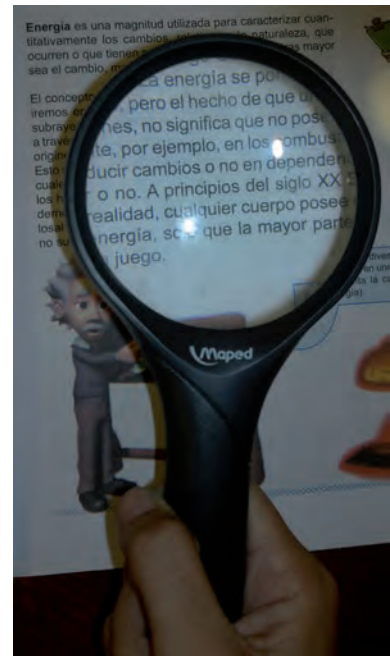


Fig. 4.27. a) El ojo adulto normal tiene dificultad para la “acomodación” cuando el objeto que mira se encuentra a menos de 25 cm. b) La lupa corrige esta situación, haciendo que los haces parezcan provenir de un lugar más alejado; al propio tiempo, aumenta el ángulo de observación y, con ello, el tamaño de la imagen en la retina.



Intenta medir en la práctica el aumento producido mediante una lupa.



¿En que caso será mayor el aumento que puede producir una lupa, cuando la utiliza un niño, o un adulto, ambos con visión normal?

De este modo, la lupa provoca dos efectos básicos: 1) aumenta el ángulo de observación y, con ello, el tamaño de la imagen en la retina y 2) los haces inciden en el ojo como si proviniesen de un objeto situado a una distancia mayor, a la cual el ojo puede acomodar sin dificultad. En consecuencia, en la retina se forma una imagen aumentada y enfocada del objeto, con lo cual sus detalles se ven mejor.

Anteriormente vimos que una lente convergente forma imágenes reales e invertidas cuando el objeto se coloca a una distancia de ella mayor que la distancia focal, como por ejemplo, en la cámara fotográfica y la retina del ojo. Ahora hemos encontrado que **si el objeto se sitúa entre la lente y su foco, puede originar imágenes virtuales derechas.**

¿Cómo determinar mediante una ecuación el aumento de una lupa?

El aumento de una lente convergente utilizada a modo de lupa no puede ser calculado del mismo modo que en el caso de imágenes reales, hallando la razón entre el tamaño de la imagen y el del objeto. El efecto que se produce es no solo de aumento de tamaño, sino también de alejamiento. El tamaño que apreciamos está determinado por el tamaño de la imagen en la retina del ojo. De ahí que:

El aumento de una lupa viene dado por el cociente entre los tamaños de las imágenes formadas en la retina del ojo cuando el objeto se observa con la lupa y cuando se observa sin ella a la mínima distancia a que el ojo enfoca cómodamente:

$$A = \frac{h_L}{h_d}$$

En esta fórmula h_L es el tamaño de la imagen en la retina al observar el objeto con la lupa y h_d al observarlo directamente.

El tamaño de la imagen en la retina, y por tanto el aumento, depende de la posición del objeto respecto a la lupa. Los mayores tamaños se logran cuando el objeto queda muy próximo a su foco. Por su parte, el tamaño de la imagen



al observar directamente el objeto depende de la distancia a que éste se coloca del ojo. En este caso, el mayor tamaño sin esfuerzo del ojo se alcanza cuando el objeto está situado a la menor distancia a que el ojo enfoca cómodamente. Pero como ya sabes, esta distancia varía con la persona y la edad. Debido a las razones anteriores, el “aumento nominal” de una lupa se calcula suponiendo que el objeto está situado próximo a su foco y que se trata de un ojo adulto promedio, para el cual la mínima distancia a que puede enfocar cómodamente es 25 cm. En la figura 4.28 se ha representado tal situación.

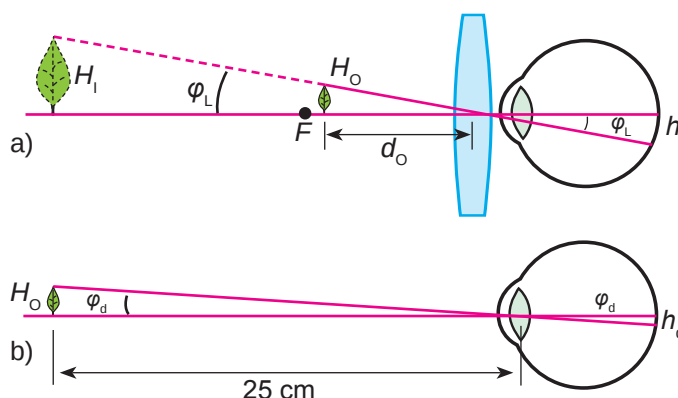


Fig. 4.28. Objeto visto: a) a través de una lupa y b) directamente y a 25 cm del ojo

Como la lupa se emplea para observar objetos o detalles pequeños, los ángulos de observación también son pequeños y, por eso, entre ellos y el tamaño de la imagen en la retina existe una relación que es aproximadamente de proporcionalidad. En otras palabras:

$$A = \frac{h_L}{h_d} \approx \frac{\varphi_L}{\varphi_d}$$

Debido a que este aumento viene dado por el cociente entre los ángulos de observación, se denomina **aumento angular**. Recuerda que el correspondiente a las imágenes reales se llama **aumento lineal**.

Por otra parte, también debido a la pequeñez de los ángulos de observación, en el esquema de la figura 4.28a, para los triángulos exteriores al ojo se tiene:

$$\varphi_d \approx \frac{H_o}{25 \text{ cm}} \quad \text{y} \quad \varphi_L \approx \frac{H_o}{d_o}$$

Por consiguiente:
$$A \approx \frac{\varphi_L}{\varphi_d} = \frac{25 \text{ cm}}{d_o}$$

Como al calcular el aumento nominal se supone que el objeto está muy próximo al foco de la lupa, $d_o \approx f$. Por consiguiente, el aumento de la lupa para un ojo adulto



normal promedio es: $A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f}$

Esta ecuación es coherente con el hecho de que mientras menor sea la distancia focal f de la lupa mayor es su aumento.

En realidad, con una lupa pueden obtenerse aumentos algo superiores a los dados por la fórmula anterior. Un análisis detenido de la figura 4.28b muestra que si el objeto se separa del foco aproximándose a la lente, el ángulo de observación ϕ crece y, por tanto, también el aumento de la lupa. No obstante, esto conduce a que la imagen se aproxime al ojo y esta aproximación para un ojo adulto normal promedio no puede ser menor de 25 cm. Por eso, en el adulto con visión normal, el máximo aumento posible se alcanza cuando el objeto se coloca entre la lente y su foco, de tal modo que la imagen virtual se ve a 25 cm del ojo. Puede demostrarse que en este caso el aumento es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} + 1$$

Mediante lupas se consigue aumentar el tamaño aparente de objetos pequeños hasta alrededor de 25 veces. Cabe advertir, no obstante, que ya para aumentos mayores de 5-10 veces, las imágenes se deforman y es necesario hacer uso del microscopio.

Ejemplo 4.5. Un adulto con visión normal utiliza una lente convergente de distancia focal 3.0 cm como lupa. Calcula: a) el aumento cuando coloca el objeto muy próximo al foco de la lente y b) el máximo aumento que puede lograr.

a) Cuando el objeto se coloca muy próximo al foco de la lente el aumento es

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \approx \frac{25 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} = 8.3$$

b) El máximo aumento se logra cuando la imagen se ve a 25 cm del ojo. En este caso el aumento es

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} + 1 \approx 9.3$$



4.4.1.4. El microscopio óptico

Se emplea para obtener grandes aumentos (de varios cientos de veces). Está compuesto, básicamente, por dos sistemas ópticos convergentes, cuyo funcionamiento conjunto puede interpretarse del siguiente modo. Uno de los sistemas, denominado **objetivo**, forma una imagen real aumentada del objeto; el otro sistema, llamado **ocular**, se utiliza en calidad de lupa para observar la imagen formada por el primero. Se realizan así dos ampliaciones sucesivas.

En la figura 4.29 se ha representado la formación de una imagen mediante un modelo de microscopio en que el objetivo y el ocular son simples lentes convergentes. El objeto es la pequeña flecha dibujada en la parte inferior del esquema. Para simplificar el diagrama, solo se han trazado haces que ayudan a comprender la formación de la imagen de la punta de la flecha. Como en otras ocasiones, los bordes de estos haces son dos rayos principales, esta vez el paralelo al eje óptico y el central. El haz que diverge de la punta de la flecha objeto, luego de atravesar la lente objetivo, forma una imagen real de dicha punta. La imagen completa de la flecha, I , es invertida y aumentada. Por su parte, el haz que diverge de la punta de esta imagen real, atraviesa la lente ocular, que actúa como lupa, y al incidir en el ojo produce una imagen virtual de dicha punta. La imagen virtual completa de la flecha, I' , es derecha respecto a la anterior y también aumentada.

El aumento global de un microscopio es el producto de los aumentos producidos por el ocular y el objetivo:

$$A = A_{oc} A_{ob}$$

En los oculares y objetivos de los microscopios aparecen indicados sus aumentos en la forma: 5x, 10x, 50x, lo que significa que la imagen aumenta 5, 10, 50 veces su tamaño.

¿Cómo determinar por medio de ecuaciones dichos aumentos?

Indaga acerca de la importancia de los microscopios y sus diferentes tipos.

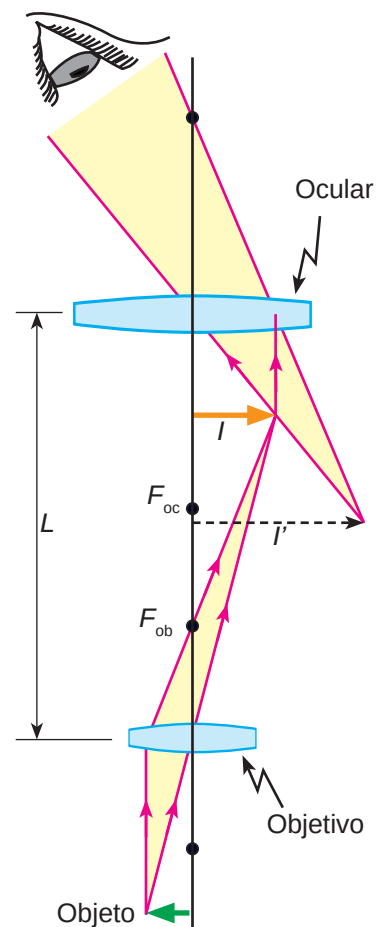


Fig. 4.29. Modelo simple de microscopio óptico.



Si suponemos que, como es habitual al utilizar la lupa, el objeto observado mediante el ocular (en este caso la imagen real I) se encuentra muy próximo a su foco, entonces, para el aumento del ocular podemos utilizar la ecuación ya conocida de la lupa:

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

Por su parte, el aumento producido por el objetivo es como el de la imagen real formada por una lente convergente:

$$A_{ob} = \frac{d_i}{d_o}$$

donde d_o y d_i son, respectivamente, las distancias del objeto y su imagen real a la lente. Algunas consideraciones permiten asignar valores determinados a d_i y d_o .

En primer lugar, como hemos supuesto que la imagen real se forma muy cerca del foco del ocular, F_{oc} , entonces del diagrama se ve que $d_i \approx L - f_{oc}$, donde L es la distancia entre el objetivo y el ocular (aproximadamente igual a la longitud del cañón del microscopio). Por otra parte, al enfocar el microscopio, comúnmente el objeto queda situado muy próximo al foco del objetivo, con lo cual $d_o \approx f_{ob}$. De este modo:

$$A_{ob} = \frac{d_i}{d_o} \approx \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}}$$



Ejemplo 4.6. Se utilizan el ocular de 10x y el objetivo de 50x de un microscopio compuesto. La distancia entre ellos es 17 cm. Determina: a) el aumento global del microscopio y b) las distancias focales del ocular y el objetivo.

a) El aumento global del microscopio es el producto de los aumentos del ocular y el objetivo:

$$A = (10x)(50x) = 500x$$

b) El aumento del ocular es $A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$

Por consiguiente, su distancia focal es

$$f_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{A_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{10} = 2.5 \text{ cm}$$

Por su parte, el aumento del objetivo es

$$A_{ob} \approx \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}}$$

De aquí que

$$f_{ob} \approx \frac{L - f_{oc}}{A_{ob}} = \frac{17 \text{ cm} - 2.5 \text{ cm}}{50} = 0.29 \text{ cm} \approx 3 \text{ mm}$$

Nótese la distancia focal tan pequeña que posee el objetivo de un microscopio.

4.4.1.5. El telescopio refractor

Existen variados tipos de telescopios refractores, que se emplean con diferentes propósitos. Se utilizan para observaciones astronómicas, terrestres e incluso en los teatros (gemelos). El telescopio se denomina **refractor** cuando sus componentes fundamentales son lentes, en los que, como ya sabes, tiene lugar la refracción de la luz.

La variante más elemental estaría constituida por una sola lente convergente. Si el objeto está muy alejado, como ocurre generalmente, entonces cerca de su foco se forma una pequeña imagen del objeto, real e invertida (Fig. 4.30). Pese a su pequeñez, el ángulo ϕ_L bajo el cual se observa esta imagen formada por la lente es mayor que el ángulo



φ_d al mirar el objeto directamente. De ahí que la imagen formada en la retina también sea más grande, dando lugar al aumento (Fig. 4.30).

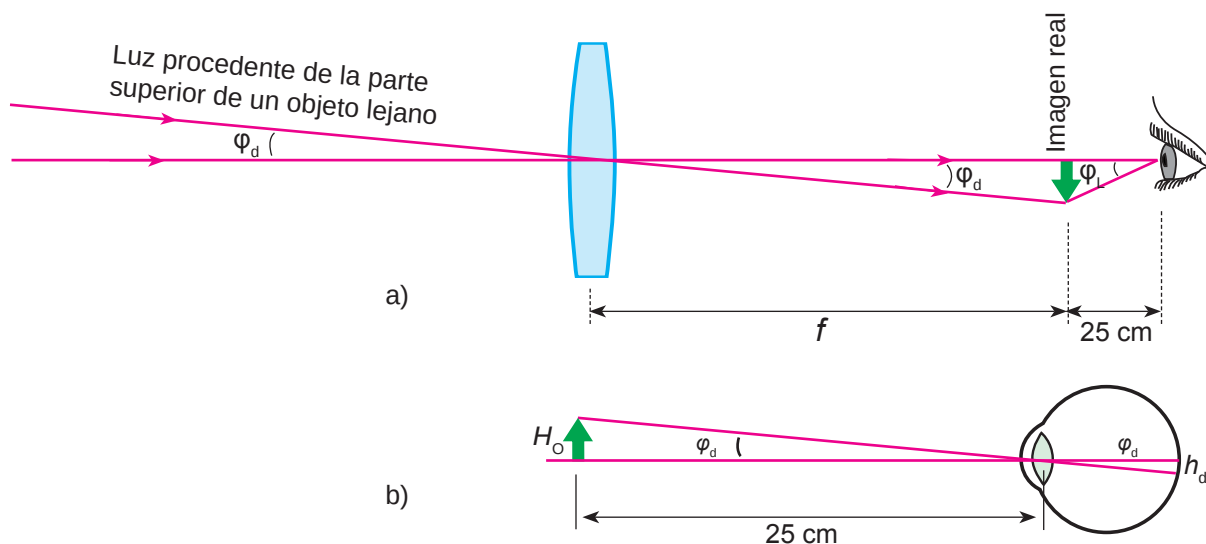


Fig. 4.30. Esquema de la formación de una imagen: a) mediante un telescopio de una sola lente y b) directamente y a 25 cm del ojo.

Nota que como la imagen se forma muy próxima al foco de la lente, si ésta hubiese tenido mayor distancia focal que la representada, entonces la imagen se habría formado más lejos de ella y su tamaño hubiese sido mayor. Mientras mayor sea la distancia focal de la lente, mayor será el tamaño de la imagen, el ángulo φ_L bajo el cual se observa y, en consecuencia, el aumento que se produce. Calculemos dicho aumento en función de la distancia focal de la lente.

Como ya sabemos, el aumento de la imagen en la retina está determinado por el aumento angular:

$$A = \frac{\varphi_L}{\varphi_d}$$

Y puesto que los ángulos de observación son pequeños, podemos escribir

$$\varphi_L \approx \frac{H_i}{25 \text{ cm}} \quad \text{y} \quad \varphi_d \approx \frac{H_o}{f}$$



Por consiguiente:

$$A = \frac{\varphi_L}{\varphi_d} \approx \frac{f}{25 \text{ cm}}$$

Nota que esta expresión del aumento es inversa a la de la lupa.

Puedes comprobar que para obtener un aumento, por ejemplo, de tan solo 4 veces, se requeriría una lente de distancia focal 1 m, y para que sea de 100 veces, la distancia focal debería ser 25 m. Ya que la imagen se formaría aproximadamente a esas distancias de la lente, tales telescopios serían extremadamente largos, y nada prácticos. Este problema puede resolverse de modo similar que en el microscopio, realizando una segunda amplificación mediante otra lente que actúa como lupa.

En la figura 4.31 se ha representado el esquema de la formación de imágenes en un telescopio astronómico constituido por dos lentes convergentes. Este modelo de telescopio se llama **kepleriano**. Al igual que en el microscopio, una lente se denomina **objetivo** y la otra **ocular**.

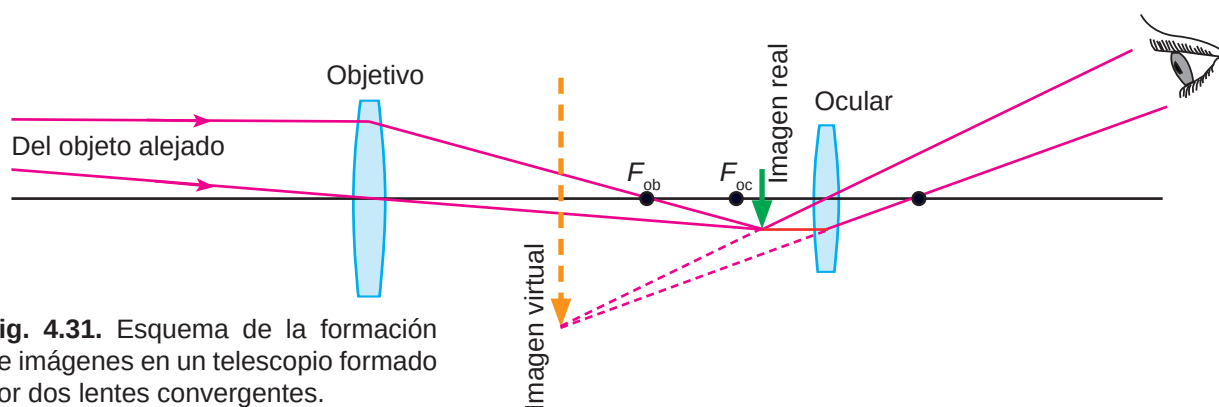


Fig. 4.31. Esquema de la formación de imágenes en un telescopio formado por dos lentes convergentes.

El objetivo forma una imagen real del objeto lejano muy cerca de su foco, cuyo aumento es, como acabamos de ver:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$



A su vez, esta imagen real es observada mediante el ocular, que como en la lupa habitual, se coloca de tal modo que la imagen observada quede muy cerca de su foco. Sabemos que en este caso el aumento es:

$$A_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

Por consiguiente, el aumento global del telescopio kepleriano es:

$$A = A_{oc} A_{ob} \approx \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} \right) \left(\frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}} \right) = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Nota que mientras mayor sea la distancia focal del objetivo en comparación con la del ocular, mayor será el aumento global del telescopio.

Puesto que en este modelo de telescopio, la imagen formada por el objetivo está muy próxima a su foco y el ocular se sitúa de modo que su foco también quede muy cerca de dicha imagen, ambos focos prácticamente se superponen. Esto significa que la distancia entre las lentes es aproximadamente igual a la suma de sus distancias focales, es decir a $f_{ob} + f_{oc}$. Conocer esto tiene importancia práctica a la hora de armar un telescopio kepleriano.

Consigue dos lentes convergentes cuyas distancias focales difieran notablemente entre sí. Colócalas (preferiblemente dentro de un tubo de cartulina) a una distancia una de otra aproximadamente igual a la suma de sus distancias focales. Mira a través de ellas hacia un objeto lejano. Para lograr una imagen nítida, acerca o aleja ligeramente una lente a la otra. Calcula el aumento del “telescopio” que has construido.





Ejemplo 4.7. Para armar un telescopio astronómico kepleriano se dispone de dos lentes convergentes, de distancias focales 70.0 cm y 3.0 cm. a) ¿A qué distancia entre sí deben colocarse las lentes? b) ¿Cuál de ellas utilizarías como objetivo y cuál como ocular? c) Calcula el aumento producido por cada lente y el aumento global del telescopio.

a) Como el telescopio se dirigirá a un objeto lejano, la imagen real del objetivo se formará cerca de su foco. Si se quiere colocar el ocular de tal modo que su foco quede próximo a dicha imagen, entonces la distancia entre las lentes debe ser:

$$70.0 \text{ cm} + 3.0 \text{ cm} = 73.0 \text{ cm}$$

b) El aumento global de un telescopio kepleriano es

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Por consiguiente, solo se obtiene un aumento mayor de 1 al utilizar la lente de mayor distancia focal como objetivo.

c) El aumento producido por el objetivo es:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}} = \frac{70 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 2.8 \text{ veces}$$

el producido por el ocular

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} \approx 8.3 \text{ veces}$$

y el aumento global

$$A = \frac{f_{ob}}{f_{oc}} = \frac{70 \text{ cm}}{3.0 \text{ cm}} \approx 23 \text{ veces}$$

Mientras más grande sea el diámetro del objetivo del telescopio, mayor será la cantidad de luz procedente del objeto que es utilizada para formar la imagen y, por consiguiente, más clara se verá. De hecho, el parámetro más importante de los grandes telescopios astronómicos es el diámetro de su objetivo y, por eso, con frecuencia se caracterizan por este parámetro. En la práctica, es difícil y muy costosa la fabricación de lentes de más de 1 m de diámetro. Por eso, los telescopios astronómicos modernos



Argumenta con ayuda de un esquema, por qué mientras mayor sea el diámetro del objetivo de un telescopio, mayor será la cantidad de luz procedente del objeto que es utilizada para formar la imagen.



emplean en calidad de objetivo espejos cóncavos y no lentes. Los telescopios refractores con los objetivos grandes fueron contruidos a finales del siglo XIX. El objetivo del telescopio refractor de luz visible más grande posee un diámetro de 1.02 m.

A continuación examinamos la formación de imágenes mediante espejos cóncavos.

4.4.2. Formación de imágenes mediante espejos cóncavos

4.4.2.1. El espejo de aumento

Como sabes, los espejos comunes, planos, producen una imagen que tiene el mismo tamaño que el objeto. Sin embargo, con frecuencia se emplean espejos curvos a fin de obtener imágenes aumentadas y apreciar detalles que de otro modo no serían visibles. Ejemplos de éstos son, el pequeño espejito utilizado por los odontólogos para examinar la boca, o ciertos espejos usados durante el maquillaje, los cuales proporcionan una imagen aumentada del cutis. *¿Cómo se explica la formación de tales imágenes aumentadas?*

En la figura 4.32 se ha representado un objeto en forma de flecha, situado entre el vértice de un espejo cóncavo y su foco. Consideremos, como otras veces, la trayectoria de un haz de luz que diverge de algún punto del objeto, por ejemplo, de la punta de la flecha O . Reiteramos, el haz puede ser cualquiera que se refleje en el espejo, pero como conocemos la trayectoria que siguen los **rayos principales**, escogemos uno cuyos bordes sean dos de estos rayos, digamos, el 1, que incide paralelamente al eje óptico del espejo y el 2, cuya dirección pasa por su centro óptico. Tales rayos se cortan en el punto I . Los haces que llegan al ojo procedentes de diversos puntos de la flecha parecen provenir de la flecha I' , y por eso se produce la sensación de que se encuentra en ese lugar. Esa es una **imagen virtual** de la flecha, pues se forma en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados.

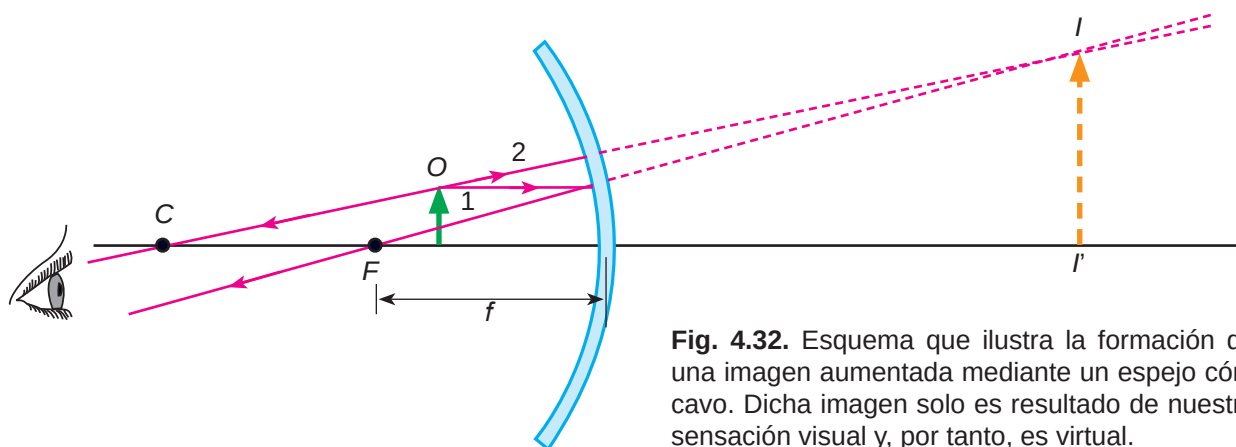


Fig. 4.32. Esquema que ilustra la formación de una imagen aumentada mediante un espejo cóncavo. Dicha imagen solo es resultado de nuestra sensación visual y, por tanto, es virtual.

Nota que el espejo cóncavo utilizado como espejo de aumento funciona de modo parecido a la lupa. Si mediante un espejo plano intentamos apreciar mejor algún detalle de nuestra cara, aproximándonos cada vez más al espejo, llegará un momento en que no podremos enfocar adecuadamente, pues al acercarnos, la imagen también se acerca al ojo y éste no puede realizar el **acomodamiento**. El espejo cóncavo provoca los dos efectos ya mencionados en el caso de la lupa:

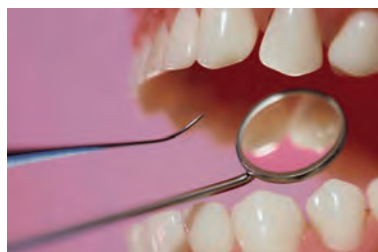
- 1) Aumenta el ángulo de observación y, en consecuencia, el tamaño de la imagen en la retina y
- 2) Los haces inciden en el ojo como si proviniesen de un objeto situado a una distancia mayor de 25 cm, a la cual el ojo puede acomodar.

De modo similar que la lupa, el espejo cóncavo funciona en calidad de espejo de aumento cuando el objeto se coloca entre él y su foco, como se dibujó en la figura 4.32.

La ecuación para calcular el aumento que produce un espejo cóncavo cuando se utiliza como espejo de aumento, es similar que para la lupa. Si se supone que el objeto está muy próximo al foco del espejo, dicha ecuación es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

En este caso f es la distancia focal del espejo.





Ejemplo 4.8. Un espejo para maquillarse se ha diseñado de tal modo que tiene un radio de curvatura de 38 cm. a) ¿Cuál es su distancia focal? b) ¿Cuál será el aumento que produce, si la cara se coloca muy cerca de su foco y la visión de la persona es normal?

a) Para un espejo esférico:

$$f = \frac{R}{2} = \frac{38 \text{ cm}}{2} = 19 \text{ cm}$$

b) Cuando la cara está muy próxima al foco del espejo el aumento es:

$$A \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \approx 1.3$$

4.4.2.2. El Telescopio reflector

Un telescopio se denomina **reflector** si su objetivo es un espejo cóncavo, en lugar de una lente.

De forma similar que una lente convergente, un espejo cóncavo puede originar no solo imágenes virtuales, sino también reales, en dependencia de la distancia a que se encuentre el objeto del espejo. Cuando el objeto está situado entre el foco y el espejo, puede dar lugar a una imagen virtual, como acabamos de ver en el caso del espejo de aumento, pero si se encuentra a una distancia del espejo mayor que su distancia focal, entonces puede formar imágenes reales.

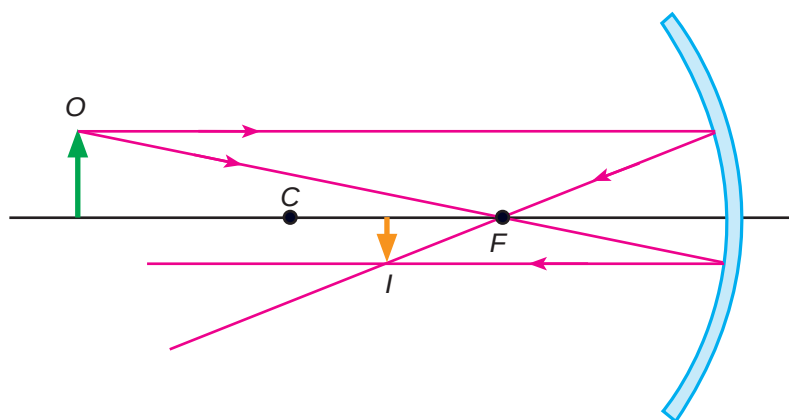


Fig. 4.33. Esquema que ilustra la formación de una imagen real mediante un espejo cóncavo.

La figura 4.33 ilustra la formación de la imagen real de una flecha situada a una distancia del espejo mayor que su distancia focal. Como haz luminoso que diverge de la punta de la flecha e incide en el espejo se ha seleccionado uno cuyos bordes son, el rayo paralelo al eje óptico del espejo y el rayo que pasa por su foco.



En la figura 4.34 se muestra un esquema del telescopio reflector construido por primera vez por Newton, alrededor de 1668. El aumento del telescopio de Newton era de 38 veces y el diámetro de su espejo cóncavo tan solo de varios centímetros.

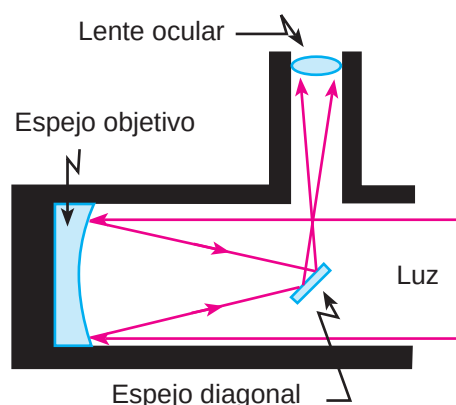


Fig. 4.34. Esquema de un telescopio reflector, construido por primera vez por Newton.



En 1668, Isaac Newton construyó el primer telescopio reflector, el cual producía un aumento de 38 veces.

El espejo cóncavo del telescopio de Newton tiene la misma función que la lente del telescopio refractor: formar una imagen real del objeto, para luego ser observada mediante el ocular.

Las ecuaciones para calcular en el telescopio reflector los aumentos del objetivo, del ocular y el aumento global, son similares a las del telescopio refractor:

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$

$$A_{oc} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}}$$

$$A = A_{oc} A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Solo que en este caso A_{ob} y f_{ob} son el aumento y la distancia focal de su espejo cóncavo, el cual funciona como objetivo.



Ejemplo 4.9. La imagen de una porción de la superficie de la Luna aparece aumentada 100 veces en un telescopio astronómico reflector. Se sabe que la distancia focal de su ocular es 3.5 cm. a) Determina los aumentos del ocular y del objetivo. b) ¿Cuál es la distancia focal y el radio de curvatura de su espejo objetivo?

a) El aumento del ocular es:

$$A_{oc} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{3.5 \text{ cm}} \approx 7.1$$

Puesto que el aumento global es

$$A = A_{oc} A_{ob} = 100$$

el del objetivo es

$$A_{ob} = \frac{100}{A_{oc}} \approx 14$$

b) El aumento del espejo objetivo es

$$A_{ob} \approx \frac{f_{ob}}{25 \text{ cm}}$$

por lo que su distancia focal es:

$$f_{ob} \approx A_{ob} (25 \text{ cm}) = (14)(25 \text{ cm}) = 3.5 \text{ m}$$

Su radio de curvatura es

$$R = 2f_{ob} \approx 7.0 \text{ m}$$



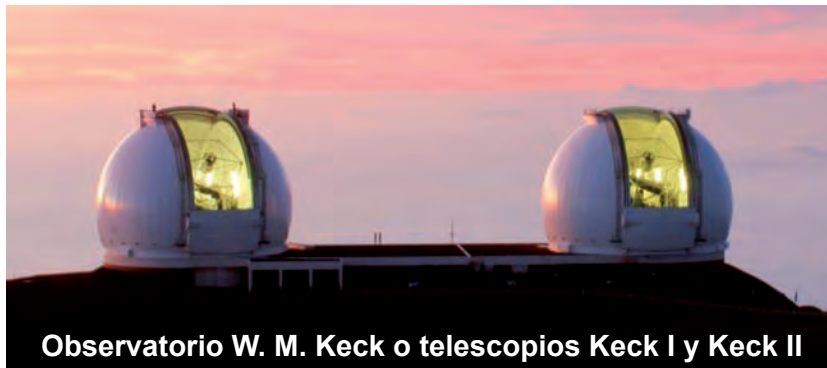
En la actualidad se han instalado numerosos telescopios reflectores, con espejos cóncavos de varios metros de diámetro. En 1990 se puso en órbita alrededor de la Tierra el telescopio Hubble, cuyo espejo principal tiene un diámetro de 2.4 m. Pronto fue descubierto que debido a un error en su fabricación, el espejo no enfocaba bien, y en 1993 fue enviada una misión espacial que le instaló algunos dispositivos de corrección óptica. El espejo del Gran Telescopio de Canarias -el mayor del mundo hasta el año 2011- tiene un diámetro de 10.4 m. Se proyectan telescopios con espejos de 30 y 40 m de diámetro, lo que representará un enorme salto en sus tamaños.



Mediante los telescopios reflectores pueden obtenerse detalles del Sol, la Luna, los planetas y de otros cuerpos celestes relativamente cercanos. Pero las estrellas se encuentran tan lejanas, que aún con los más potentes telescopios, la imagen que se forma de ellas es extremadamente pequeña, debido a lo cual no es posible distinguir detalles. Lo que aumenta el telescopio en este caso no son, pues, los detalles, sino **la cantidad de luz que llega al ojo**. Su espejo concentra una cantidad de luz proveniente de las estrellas, millones de veces mayor que la pupila del ojo. Como resultado, la iluminación de la retina también es varios millones de veces mayor, lo que hace posible observar estrellas tan débiles o lejanas que no se distinguen a simple vista. Adicionalmente, muchas observaciones astronómicas no se realizan directamente mediante el ojo, sino utilizando películas fotográficas y tiempos de exposición largos. Esto permite registrar objetos celestes que nuestro ojo no es capaz de apreciar.

Calcula cuántas veces mayor es el diámetro del espejo del telescopio Keck, comparado con el de la pupila de un ojo común.

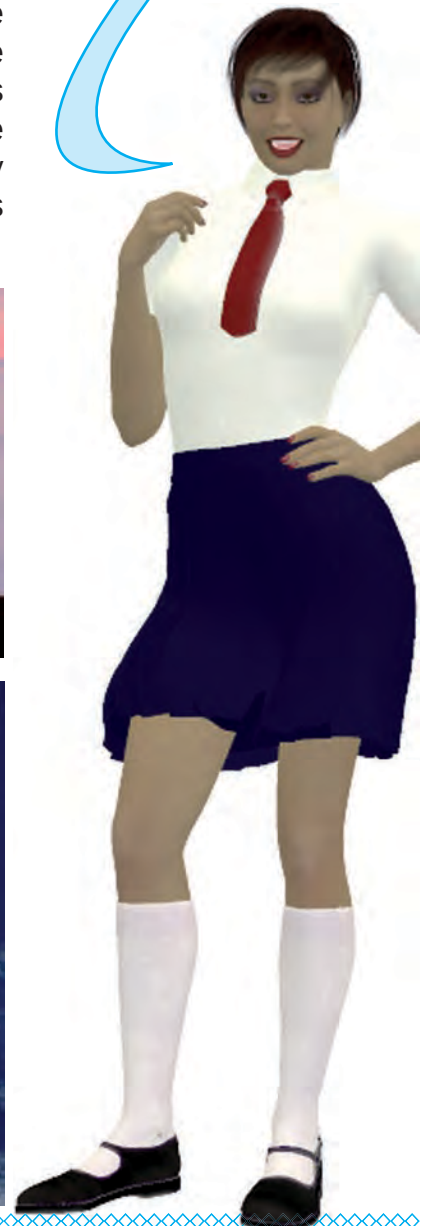
Indaga acerca de importantes datos obtenidos mediante el telescopio espacial Hubble.



Observatorio W. M. Keck o telescopios Keck I y Keck II



Telescopio espacial Hubble





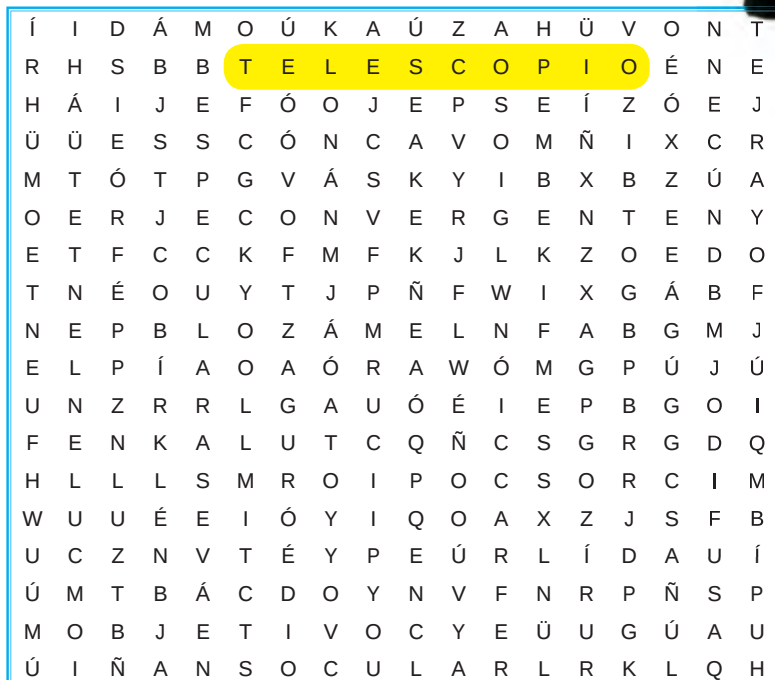
4.5. Actividades de sistematización y consolidación

4.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

Aumento
Cóncavo
Convergente
Difusa
Especular
Espejo
Fuente
Haz
Imagen
Lente
Lupa

Luz
Microscopio
Objetivo
Objeto
Ocular
Rayo
Reflexión
Refracción
Telescopio
Virtual



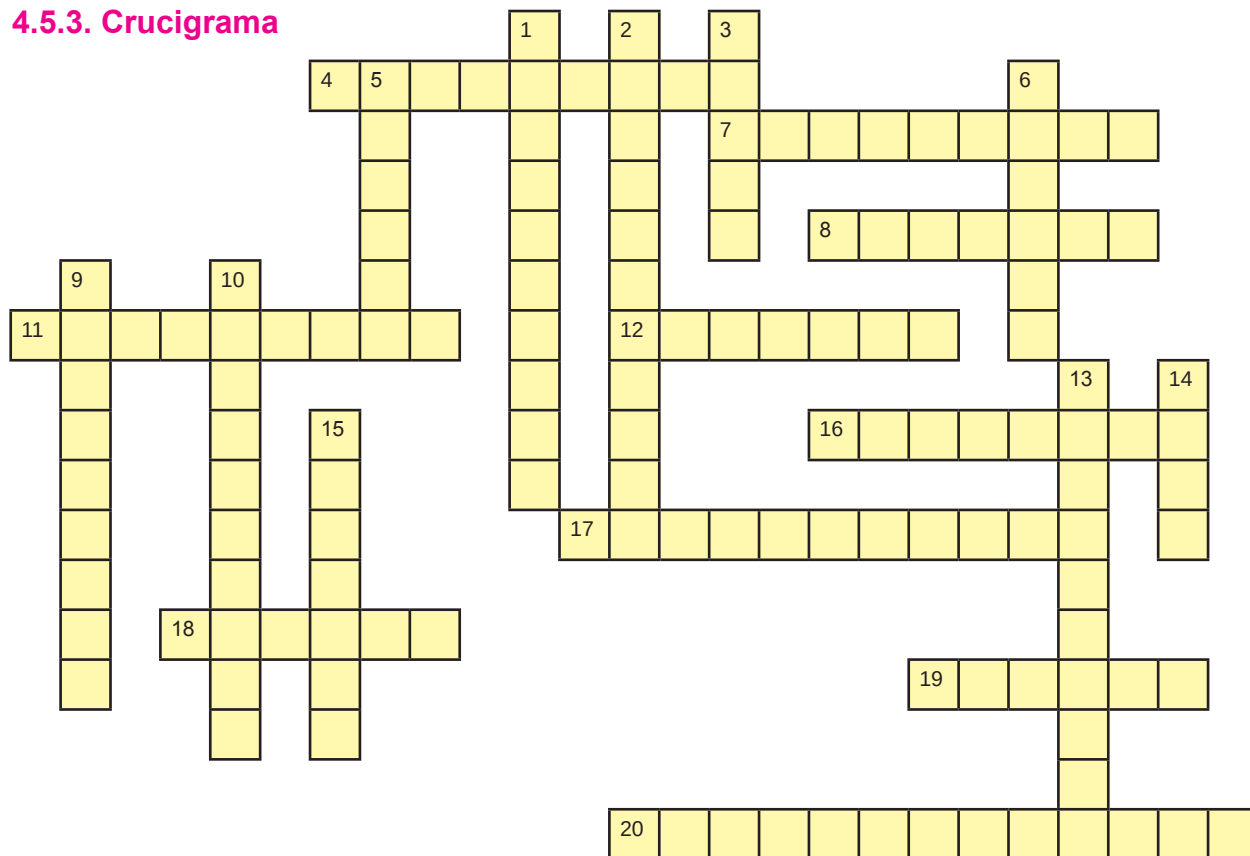


4.5.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Óptica geométrica. () Se obtiene del cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto.
2. Primera ley de la reflexión. () El rayo reflejado está en el plano que contiene el rayo incidente y es perpendicular a la superficie del espejo.
3. Ecuación que expresa la segunda ley de la reflexión. () Representan el grado de capacidad de hacer converger haces de luz. En el caso de una lente, el inverso de la distancia focal en metros es llamada de ésta manera.
4. Primera ley de la refracción. () El rayo refractado está en el plano determinado por el rayo incidente y la perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.
5. Segunda ley de la refracción. () $n_1 \sin i = n_2 \sin r$
6. ¿Qué es la imagen virtual de un espejo plano? () Es la línea que une los puntos centrales de las esferas a que pertenecen las superficies de la lente y el espejo.
7. ¿En qué consiste el índice de refracción de un material? () Las lentes y los espejos esféricos.
8. ¿En qué consiste la reflexión total interna? () $r = i$
9. ¿A qué se llama eje óptico principal de una lente y un espejo esférico, respectivamente? () Es la comparación entre la rapidez de la luz en el vacío y la rapidez de la luz en el medio material considerado.
10. ¿Qué instrumentos ópticos tienen la modalidad de ser convergentes o divergentes? () Imagen de un objeto que se forma en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados o refractados.
11. ¿Qué son las dioptrías? () Parte de la óptica que se apoya en el trazado de haces y rayos.
12. ¿Cuál es el aumento lineal en las lentes convergentes? () Contracción o relajación de los músculos ciliares del ojo que provocan una variación en la curvatura del cristalino para un enfoque adecuado.
13. Acomodamiento del ojo. () Se obtiene al calcular el cociente entre la distancia focal del objetivo y la distancia focal del ocular.
14. ¿Cuál es el aumento de una lupa? () Se obtiene al tomar el producto de los aumentos producidos por el ocular y el objetivo de la misma.
15. ¿Cuál es el aumento global de un microscopio óptico? () Se denomina así al instrumento óptico que permite ver detalles de objetos alejados y cuyos componentes principales son lentes.
16. ¿Qué es un telescopio refractor? () Se obtiene al calcular el cociente entre el ángulo bajo el cual se observa un objeto o mediante la lupa y el ángulo bajo el que se observa sin ella.
17. ¿Cuál es el aumento proporcionado por un telescopio refractor? () Se denomina así al instrumento óptico que permite ver detalles de objetos alejados y cuyo objetivo consiste en un espejo cóncavo.
18. ¿Qué es un telescopio reflector? () Es el fenómeno en el cual, la luz incidente en la superficie de separación entre dos medios transparentes, no da lugar a la refracción.
19. ¿Cuál es el aumento proporcionado por un telescopio reflector? () Se obtiene al calcular el cociente entre la distancia focal y la distancia mínima a la cual el ojo adulto normal puede enfocar sin dificultad.



4.5.3. Crucigrama



Horizontales

4. Fenómeno el cual consiste en que parte de la luz que incide sobre la superficie de un cuerpo es devuelta al medio del cual procede.
7. Adjetivo que caracteriza a las lentes y espejos cuyas superficies son esferas.
8. Tipo de aumento que caracteriza a una lupa.
11. Tipo de telescopio cuyo objetivo está constituido por un espejo curvo.
12. Calificativo del espejo constituido por la parte interior de una superficie esférica.
16. Nombre del componente óptico de un microscopio o telescopio que se dirige hacia el objeto que se desea observar.
17. Lente en la cual los rayos que inciden paralelos a su eje óptico convergen después de atravesarla.
18. Tipo de reflexión que se produce al incidir la luz sobre una superficie rugosa.
19. Tipo de aumento que caracteriza la relación entre el tamaño de un objeto y el de una imagen real de él.
20. Proceso que consiste en el aumento involuntario de la curvatura del cristalino del ojo humano, a fin de enfocar los objetos que miramos.

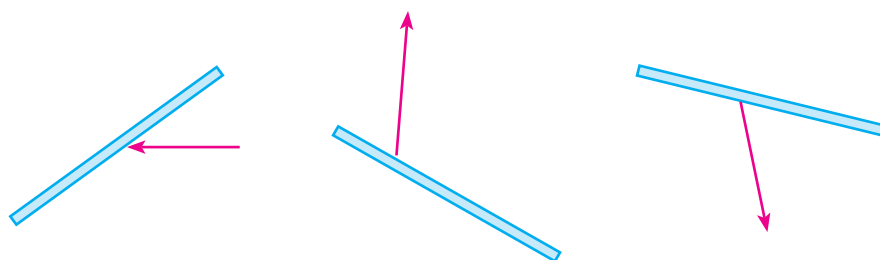
Verticales

1. Fenómeno que consiste en la transmisión de la luz de un medio a otro transparente, en el que se produce un cambio de su velocidad de propagación.
2. Dispositivo óptico empleado para lograr grandes aumentos de objetos cercanos.
3. Apellido de la persona quien encontró la ecuación que relaciona el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción.
5. Superficie lisa y pulida que refleja la luz en una dirección bien definida.
6. Nombre del componente óptico de un microscopio o telescopio, donde se aplica el ojo.
9. Tipo de telescopio cuyos componentes básicos son lentes.
10. Calificativo de aquella parte de la Óptica que se apoya en el trazado de líneas rectas y el uso de la geometría.
13. Lente en la cual los rayos que inciden paralelos a su eje óptico divergen luego de atravesarla.
14. Punto donde convergen los rayos que inciden paralelos al eje óptico de una lente convergente o un espejo cóncavo.
15. Calificativo que recibe la imagen que apreciamos cuando miramos un objeto a través de un espejo plano.



4.5.4. Actividades de repaso

1. La mayor parte de la luz que percibimos procede de fuentes de luz reflejada. ¿Suced algo similar con los sonidos?
2. ¿Por qué el vidrio ordinario se vuelve mate cuando se frota con esmeril?
3. En un día soleado, mira hacia el exterior a través de una ventana o puerta de vidrio; esta parecerá completamente transparente, casi invisible. Si la observación se repite por la noche, los objetos de la habitación se verán reflejados en el vidrio ¿Cómo se explica la diferencia entre lo que se observa de día y de noche?
4. En un espejo ordinario, ¿la reflexión es absolutamente especular? Argumenta tu respuesta.
5. Un haz de luz penetra en una caja por un orificio practicado en su pared frontal y sale por otro en la pared opuesta. Si dentro de la caja el aire está limpio, ¿se verá el haz luminoso cuando se mira el interior de la caja a través de un orificio en su pared lateral? ¿Y si la caja se llena de humo? Explica tus respuestas.
6. Cuando en una habitación tratamos de escribir algo con solo la luz de una vela, puede ayudar si colocamos detrás de ésta un espejo. ¿Por qué?
7. En la figura se ha representado un espejo plano en diferentes posiciones y las direcciones de los haces incidentes o reflejados. Completa los esquemas trazando las direcciones de los haces incidentes o reflejados que faltan.

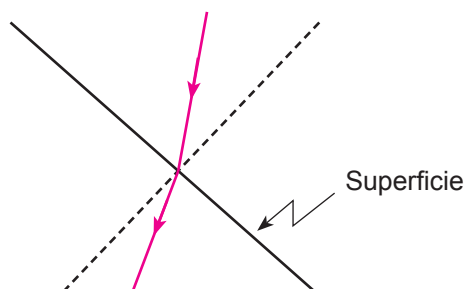


8. Localiza las posiciones de las imágenes de los objetos representados en las figuras.

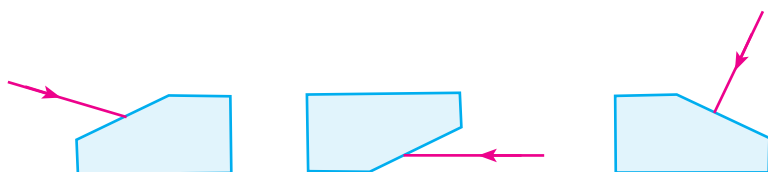




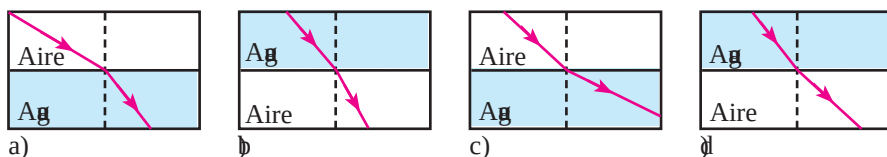
9. En el siguiente esquema, ¿cuál es el ángulo de incidencia y cuál el de refracción?



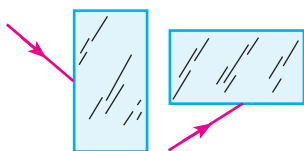
10. En la figura se muestran varios rayos luminosos que inciden sobre las superficies planas de algunos pedazos de vidrio. a) Representa los rayos reflejados. b) Representa, aproximadamente, los rayos refractados.



11. A continuación se muestran varios esquemas de dos porciones, una de aire y otra de agua, la superficie de separación entre ellas y las posibles trayectorias de los rayos incidentes y refractados. ¿Cuáles podrían ser correctos y cuáles no? Argumenta tu respuesta.



12. En la figura se han representado dos cuerpos de vidrio sobre los cuales inciden sendos haces luminosos. Utilizando la segunda ley de la refracción, continúa en cada caso la trayectoria aproximada del haz hasta salir del vidrio.



13. Una piscina parece tener menor profundidad llena de agua que vacía. ¿Cómo se explica esto?

14. Describe algún procedimiento para determinar la velocidad de la luz en un cuerpo transparente.



15. ¿A qué distancia de la película fotográfica estará la lente convergente de una cámara fotográfica cuando se fotografía un objeto muy alejado?
16. Una cámara fotográfica forma sobre la película la imagen del rostro de una persona. Explica, valiéndote de un dibujo, por qué la imagen del paisaje que se divisa a lo lejos, detrás de la persona, no es nítida. ¿Hacia dónde habría que desplazar el objetivo de la cámara para que la imagen del paisaje fuese nítida? ¿Sería nítida la imagen del rostro en ese caso?
17. El ojo humano es muy parecido a una cámara fotográfica, sin embargo, cuando se deja abierto el obturador de la cámara y el objeto se mueve delante de ella, la fotografía aparece borrosa. ¿Por qué no vemos borrosos los objetos que se mueven frente a nosotros?
18. Un objeto se encuentra muy alejado de una lente. Describe cómo cambian el tamaño y la posición de la imagen real del objeto según se acerca a la lente.
19. Por medio de una lente se obtiene la imagen real de una lámpara en una pantalla. ¿Cómo variará la imagen si se tapa la mitad derecha de la lente?
20. Construye la imagen de una flecha formada por una lente convergente cuya distancia focal es 5 cm. Considera los casos en que la flecha se sitúa a: a) 10 cm y b) 7 cm. Describe las características de la imagen en cada caso. ¿Cuántas veces mayor (o menor) es la imagen comparada con el objeto?
21. Como sabes, para ver la imagen real formada mediante una lente convergente puede utilizarse una pantalla. ¿Es posible hacer lo mismo con una imagen virtual? ¿Pueden ser fotografiadas esas imágenes?
22. Muestra mediante un diagrama de rayos que el aumento de la imagen real formada por un espejo cóncavo es menor que la unidad si el objeto se encuentra a mayor distancia del espejo que su centro de curvatura y que es mayor que la unidad cuando se encuentra entre ese punto y su foco.
23. Los observatorios astronómicos suelen ubicarse en zonas alejadas de las ciudades y elevadas. Da algunas razones para ello.
24. Elabora un esquema o cuadro sinóptico que refleje los principales conceptos e ideas de este capítulo y las relaciones entre ellos.
25. Escribe un resumen de las ideas y ecuaciones esenciales estudiadas en el capítulo.



4.5.5. Ejercicios de repaso

1. Utilizando la ley de Snell, determina el índice de refracción del líquido contenido en la vasija de la figura 4.9.

Respuesta: 1.3.

2. Un haz luminoso llega desde el aire a cierto medio transparente con un ángulo de incidencia de 40.0° . Si el ángulo de refracción es 25.4° , a) ¿cuál es el índice de refracción del material, b) ¿cuál es la velocidad de la luz en él?

Respuesta: a) 1.50 b) 2.0×10^8 m/s.

3. Un haz luminoso que se propaga en el aire, llega a la superficie de un cuerpo transparente con un ángulo de incidencia de 60° . Se observa que el haz reflejado es perpendicular al refractado. Determina el índice de refracción del cuerpo.

Respuesta: 1.7.

4. Si los rayos solares bajo el agua forman un ángulo de 25° con la vertical, ¿A qué ángulo por encima del horizonte se encuentra el Sol?

Respuesta: 34.2° .

5. El ángulo límite para la superficie de separación entre el aire y cierto líquido es 42.8° . ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?

Respuesta: 1.47.

6. Si la distancia focal de una lente es 40 cm, ¿cuántas dioptrías tiene? A una persona le prescribieron lentes de 2.0 dioptrías, ¿cuál es la distancia focal de esas lentes?

Respuesta: 2.5 dioptrías; 50 cm.

7. Un adulto de visión normal utiliza una lupa de 8.0 cm de distancia focal. ¿Cuál es el máximo aumento que puede lograr? Si su hijo es capaz de enfocar sin dificultad objetos situados a 12 cm del ojo, ¿cuál será el máximo aumento que logra con esa lupa?

Respuesta: 4.1 veces; 3 veces.

8. Una lupa está catalogada como de 3x para un ojo normal y cuando el objeto se sitúa muy próximo a su foco. ¿Cuál será el aumento que produce al utilizarla de esa forma: a) una persona que no enfoca correctamente a menos de 40 cm, b) un niño que puede enfocar a 15 cm?

Respuesta: a) 4.8 veces; b) 8 veces





9. En el laboratorio de biología se utiliza un microscopio óptico compuesto, el cual tiene un ocular de $5\times$ y un objetivo de $50\times$. La distancia entre ellos es de 17 cm. Determina: a) el aumento global del microscopio, b) la distancia focal del ocular, c) la distancia focal del objetivo.

Respuesta: a) $250\times$ b) 5.0 cm; c) 0.24 cm.

10. Para armar un telescopio kepleriano se dispone de dos lentes convergentes de distancias focales 50.0 cm y 2.50 cm, respectivamente. a) ¿A qué distancia aproximada deben colocarse una de la otra? b) ¿cuál es el aumento global del telescopio. c) ¿cuáles son los aumentos del objetivo y del ocular?

Respuesta: a) 52.5 cm; b) 20 veces; c) 2 veces, 10 veces.

11. Un espejo cóncavo tiene radio de curvatura de 40.0 cm. a) ¿Cuál es su distancia focal? b) ¿Cuál será el aumento que produce cuando a través del espejo se mira un objeto situado muy cerca de su foco?

Respuesta: a) 20 cm; b) 1.25 veces.



5 ACTIVIDADES PRÁCTICAS





Actividades prácticas

Las actividades prácticas son parte esencial del aprendizaje de la Física. Durante ellas se enriquecen con experiencia concreta determinados conocimientos y se obtienen otros; se aprende a razonar a partir de condiciones reales; se desarrollan habilidades para la medición, el manejo de instrumentos y el procesamiento e interpretación de datos; se gana experiencia en la elaboración de informes acerca del trabajo realizado. En resumen, se adquieren conocimientos, habilidades y métodos de trabajo que no es posible obtener mediante otras actividades. A continuación se incluye un conjunto de actividades prácticas sobre Electricidad y Óptica, estrechamente relacionadas con el material del texto. Se han agrupado en dos apartados, en el primero se proponen actividades sencillas, que pueden ser realizadas en la casa o el aula. Éstas no exigen realizar mediciones precisas ni evaluar la incertidumbre de los resultados. Su objetivo fundamental es utilizar los conceptos básicos estudiados para analizar reflexivamente diversas situaciones prácticas, así como desarrollar algunas habilidades. El segundo apartado está dedicado a las prácticas de laboratorio, las cuales, como su nombre indica, deben ser realizadas en el laboratorio, con el instrumental adecuado. En varias de ellas se presta atención a las mediciones y a la evaluación de la incertidumbre de los resultados.

5.1. Actividades prácticas para la casa o el aula

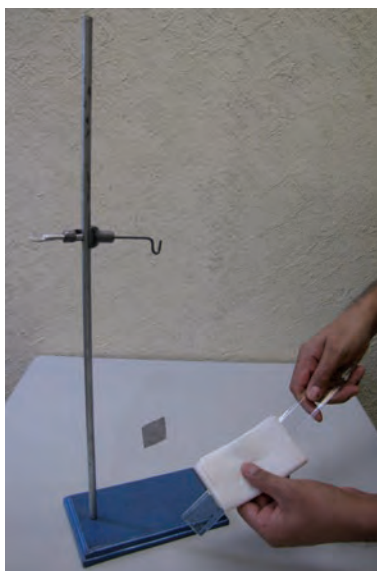
5.1.1. Electricidad y su naturaleza

1. Repulsión electrostática. Recorta dos tiras rectangulares de una bolsa de productos. a) Sitúa las tiras sobre la mesa, una al lado de la otra y frótalas repetidas veces con un dedo. Tómalas por un extremo e intenta aproximarlas entre sí. ¿Cómo se explica lo sucedido?





2. Explicación microscópica de fenómenos electrostáticos. Cuelga un pedazo de papel metálico (de unos 2 cm de largo por 2 cm de ancho) de un hilo aislante. A continuación frota intensamente una regla plástica con papel. Describe y explica desde el punto de vista microscópico lo que sucede cuando: a) se aproxima la regla plástica al papel metálico, b) el papel metálico es tocado con la regla plástica y luego ésta se aproxima nuevamente al papel, c) permaneciendo el papel metálico desviado de su posición de equilibrio a causa de la repulsión de la regla, se toca con un dedo.



3. Rayo en miniatura. Frota fuertemente con papel una regla de plástico o una lámina de acetato y aproxímalas poco a poco a un cuerpo metálico. Si lograste electrizar la regla intensamente, podrás escuchar un débil chasquido y en una habitación oscura pudieras incluso ver una pequeña chispa. Teniendo en cuenta la distancia que había entre la superficie de la regla y la superficie metálica cuando saltó la chispa, estima la diferencia de potencial entre ambas superficies.



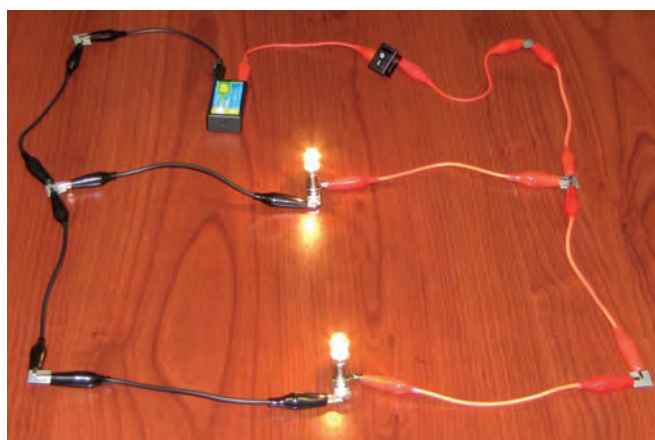
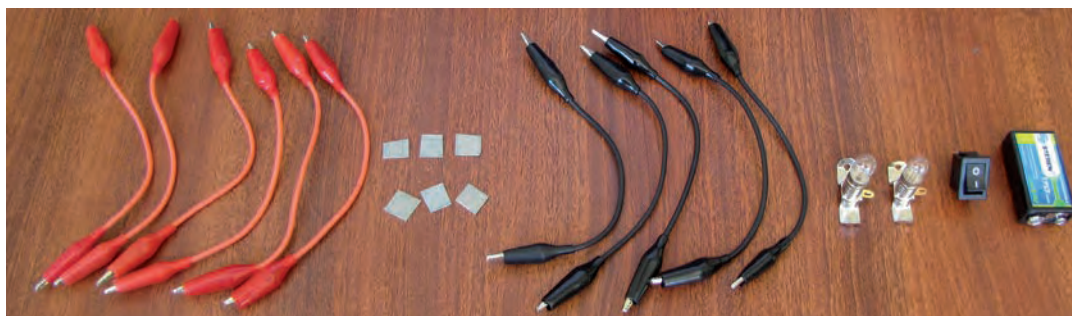


4. *Principio de separación electrostática.* Mezcla pimienta (también puedes utilizar te de una bolsita) con sal común. Frota intensamente una regla plástica y aproxímalas a la mezcla. ¿Qué sucede? El procedimiento de separación electrostática es utilizado en las chimeneas para retirar hollín del humo. Indaga en Internet sobre ello.

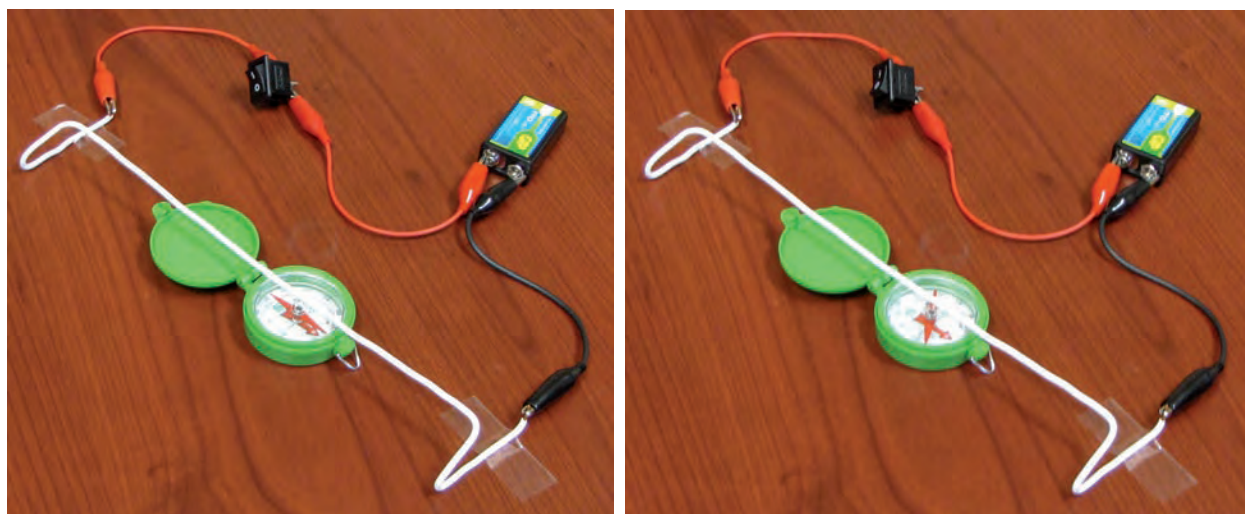


5.1.2. Corriente eléctrica y circuitos

5. *Resistores en serie y en paralelo.* Procura dos pequeños bombillos con sus soportes (sockets), una pila y 10 cables de conexión (también puedes utilizar pedazos de alambre eléctrico). Forma circuitos en que los bombillos estén conectados en serie y en paralelo. ¿En qué caso la intensidad luminosa de los bombillos es mayor? Asegúrate que el voltaje de la pila utilizada no sobrepase el indicado en los bombillos, de lo contrario éstos podrían fundirse.



6. Experimento de Oersted. Consigue una brújula, una pila eléctrica y un alambre de cobre. En un lugar donde no haya objetos ferrosos deja que la aguja de la brújula se oriente en el campo magnético de la Tierra. A continuación coloca un tramo del alambre encima de la aguja de la brújula, paralelo a ella. Por un instante haz contacto entre los extremos del alambre y los de la pila, de modo que el circuito se cierre. Identifica el sentido del campo magnético de la Tierra y el de la corriente en el alambre. Utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo magnético originado por la corriente. Verifica si la desviación de la aguja es la esperada.



5.1.3. Naturaleza y propagación de la luz

7. Espectro de colores de la luz solar. Vierte agua en una bandeja hasta unos diez centímetros de su fondo y sitúa un espejito recostado a su pared, como se muestra en la fotografía. Haz que la luz solar incida sobre el espejito y se refleje en él. Manipula el espejito hasta proyectar el espectro de colores de la luz solar en una pared o en un pedazo de cartulina blanca. ¿Cómo se explica la aparición de diversos colores a partir de la luz solar?

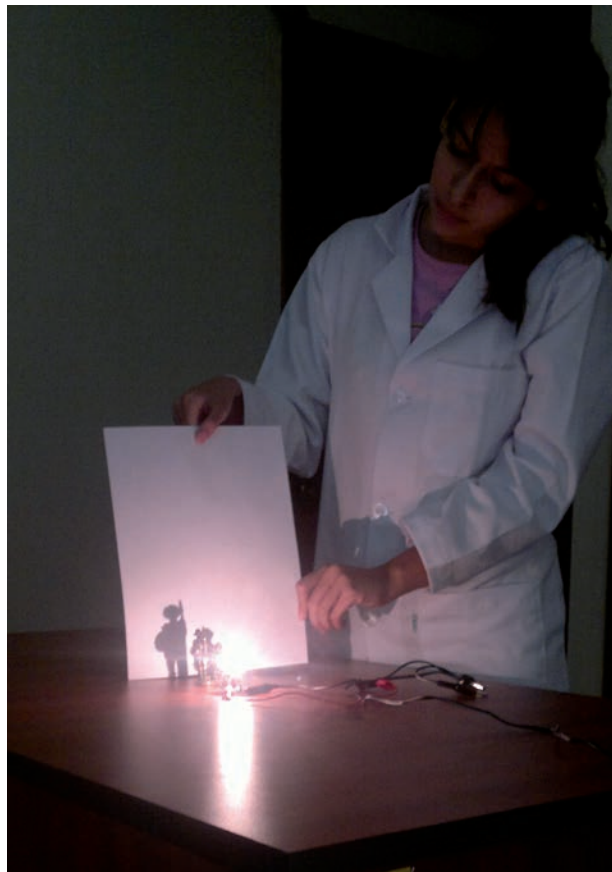


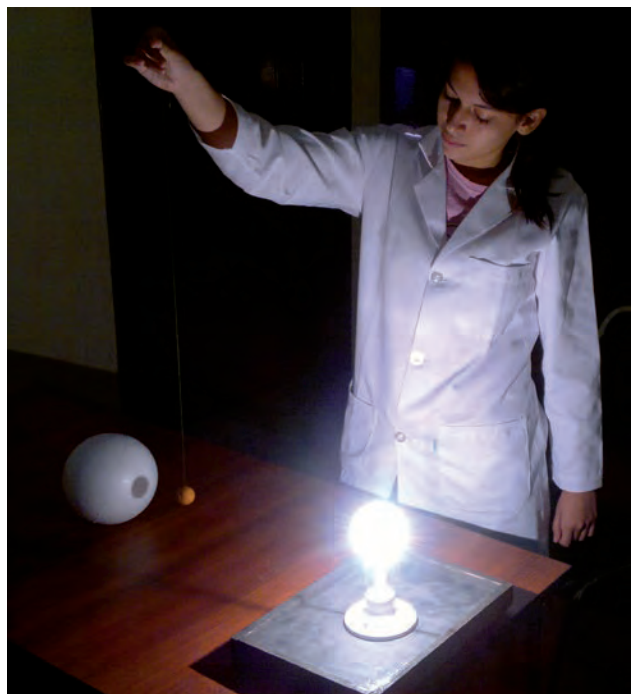


8. Propagación rectilínea de la luz. Sitúa varios alfileres en posición vertical, de modo que estén en una línea recta. Si cierras un ojo y colocas el otro en línea con los alfileres, el primero de los alfileres impide ver el resto. ¿Por qué esto apoya la idea de que en los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta?

9. Formación de sombras. Utiliza como fuente luminosa un bombillo de filamento incandescente, de vidrio transparente. Sitúa un cuerpo opaco entre la fuente luminosa y una hoja de papel. a) ¿Qué sucedería con la forma de la sombra del cuerpo si la luz no se propagase en línea recta? b) Ensaya cómo varía el tamaño de la sombra en dependencia de las distancias entre la fuente, el cuerpo y la

pantalla. c) Explica los resultados obtenidos con ayuda de un esquema.





10. Simulación de eclipses. Simula un eclipse de Luna y otro de Sol utilizando un bombillo para representar al Sol y dos cuerpos esféricos, uno mayor que otro, para representar a la Tierra y a la Luna (por ejemplo una esfera de frigolit y una pequeña bola de plastilina). Ilumina el cuerpo esférico mayor mediante el bombillo y mueve el pequeño alrededor de él en una circunferencia.



11. Estimación del diámetro de la Luna. Una mañana en que la Luna se vea prácticamente completa, toma una regla y con el brazo bien extendido mide su diámetro aparente y la distancia de la regla a tus ojos. Representa en un esquema a la Luna y a los rayos que procedentes de ella pasan por los extremos del diámetro aparente medido y llegan al ojo. Utiliza dicho esquema y los resultados de las mediciones realizadas, para estimar el diámetro de la Luna conociendo que está a unos 380 000 km de nosotros.



12. Cámara oscura. Una variante consiste en utilizar un cilindro de cartón (de algún envase, o construido por ti) de alrededor de 10 cm de largo. Cubre uno de sus extremos con un pedazo de material traslúcido (sirve un pedazo recortado de algunas bolsas utilizadas en las tiendas, el cual fijas al cilindro por medio de una liga). El otro extremo del cilindro lo tapas con un pedazo de cartón en cuyo centro realizas un orificio de 2-3 mm de diámetro mediante un alfiler. Si diriges la parte del orificio hacia una ventana u objeto bien iluminado, podrás ver su imagen en el material traslúcido. Describe las características de la imagen y explica su formación por medio de un esquema y el trazado de rayos. ¿Por qué al aumentar el tamaño del orificio, la imagen es más brillante pero menos nítida, desenfocada?



13. Aumento producido gracias a un pequeño orificio. Acerca los ojos a la pantalla de una computadora hasta ver las letras borrosas y luego, cerrando una mano en puño y haciendo con ella una especie de tubo con un pequeño orificio, mira nuevamente las letras. Otra variante consiste en preparar un pedazo de cartulina con pequeño orificio y mirar a través de él y desde muy cerca un texto de letra pequeña. ¿Cómo se explican el aumento de tamaño y de nitidez al mirar a través de pequeños orificios?

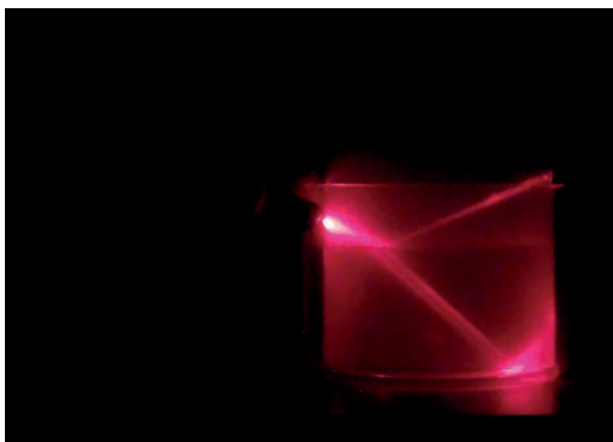




14. Determinación del aumento producido por un pequeño orificio. En un pedazo de papel blanco traza dos pequeñas líneas separadas 2 mm entre sí y en otro pedazo dos líneas separadas 2 cm. Mediante un ojo observarás las líneas de 2 mm a través de un pequeño orificio y mediante el otro ojo observarás las líneas de 2 cm directamente. Aproximando el papel con las líneas de 2 mm al orificio, logra que la imagen de las líneas obtenida con un ojo coincida con la obtenida por el otro. ¿Qué aumento se obtiene al observar a través del pequeño orificio? Traza un esquema de rayos que explique dicho aumento.



15. Propagación no rectilínea de la luz. Llena un vaso transparente con agua y coloca verticalmente dentro de él un rectángulo de plástico blanco. Haz incidir el haz de luz de un puntero láser en la superficie del agua de modo que sea rasante al rectángulo plástico y deje en él su "huella". ¿Qué sucede con la dirección de propagación de la luz al penetrar en el agua? *Atención: La luz láser no debe incidir directamente en los ojos, pues puede dañarlos.*





5.1.4. Óptica geométrica

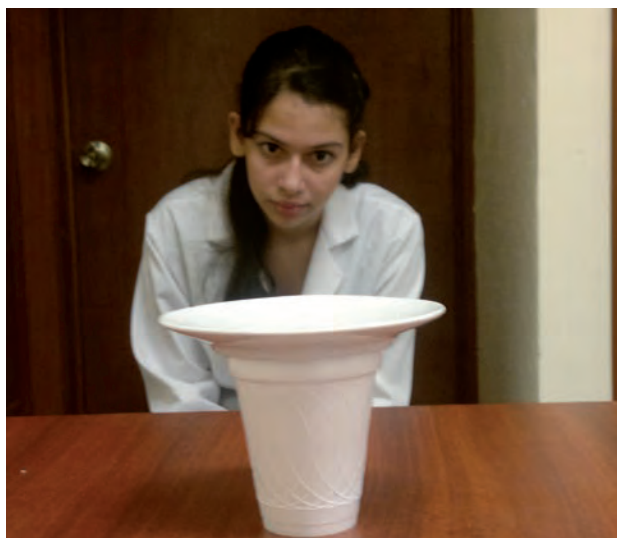
16 Reflexiones especular y difusa. En una habitación oscura coloca un pequeño espejo sobre una hoja de papel, de modo que su superficie especular quede perpendicular a la hoja. Dirige el haz de luz de una linterna sobre el espejo, de forma que deje su “huella” en la hoja de papel. Ahora sustituye el espejo por una porción de hoja blanca y repite la operación. Señala diferencias entre la reflexión en un caso y en el otro. ¿Cómo se explican estas diferencias? Argumenta la importancia de las reflexiones difusa y especular en nuestras vidas.



17. Visibilidad de los objetos que nos rodean. En una habitación semioscura observa una hoja de papel blanco, otra de papel negro mate y una lámina de vidrio. Cuál se ve mejor y cuál peor. ¿Cómo se explica esto? ¿Qué características tiene la luz reflejada en cada uno de los tres cuerpos?



18. Formación de imagen mediante un espejo plano. Coloca un portaobjetos de microscopio sobre una hoja de papel blanco de modo que su superficie sea perpendicular a la hoja. A un lado del portaobjetos y cerca de él, traza una crucecita en el papel. Advierte la imagen de la crucecita del otro lado del portaobjetos. ¿Por qué pese a que el portaobjetos es transparente, actúa como un espejo? ¿Cómo son las distancias del objeto al espejo y de este a la imagen? ¿Cómo pudieras utilizar una instalación similar a esta para calcar un dibujo?



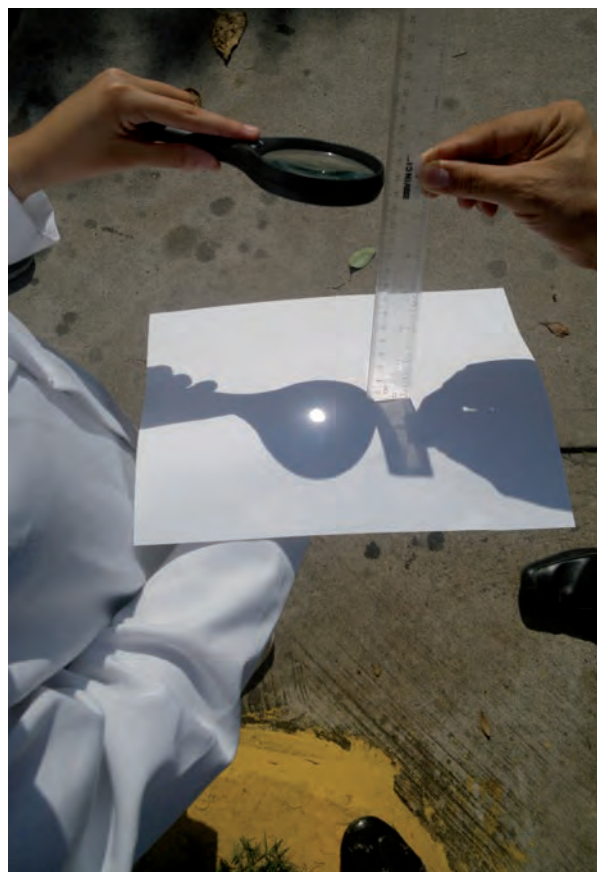
19. Refracción de la luz. a) Sitúate frente a un platillo en el cual se ha colocado una moneda. Baja la cabeza poco a poco hasta que la moneda deje de verse. Si ahora viertes agua en el platillo, la moneda se hará visible nuevamente. ¿Cómo se explica esto? b) Vierte agua en un vaso e introduce un lápiz parcialmente en ella. Mira el lápiz lateralmente y casi rasante a la superficie del agua. Explica lo observado.





20. Reflexión total interna. Introduce un lápiz dentro de un tubo de ensayos y a su vez éste dentro de un vaso con agua. Mira hacia el lápiz a través del agua del vaso. ¿Puedes verlo? ¿Cómo se explica esto?

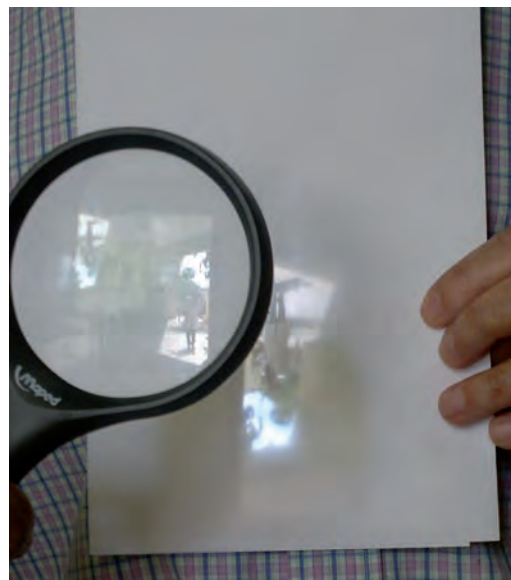
21. Distancia focal de una lente convergente. Consigue una lente convergente (pueden servir una lupa, o algunas lentes para corregir la visión) y ensaya la concentración de luz solar mediante ella. a) Determina la distancia focal de la lente. b) Calcula su poder convergente (en dioptrías) y compáralo con el nominal.





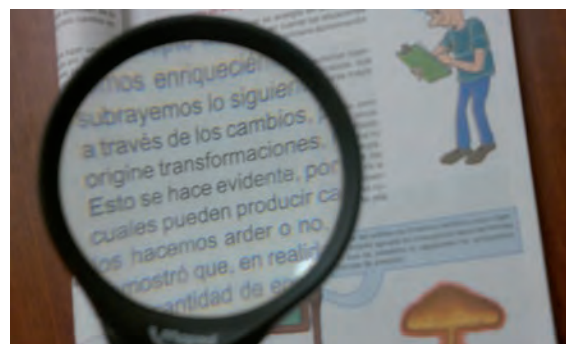
22. Formación de imágenes mediante una lente convergente.

Toma una lente y obtén las imágenes de una lámpara, una ventana, algún objeto bien iluminado, etc. Como pantalla puedes utilizar una hoja de papel blanco o algún material traslúcido (sirve el material de algunas bolsas de las tiendas). Estudia lo que ocurre con la imagen al variar las distancias entre el objeto, la lente y la pantalla y trata de explicar los resultados mediante un esquema de la situación y el trazado de rayos característicos.



23. Distancia mínima a que el ojo enfoca cómodamente.

Aproxima poco a poco este libro a la cara, hasta que las letras de su texto dejen de enfocarse bien. La distancia a que se encuentra el texto de los ojos se denomina “mínima distancia de visión distinta” y también “punto próximo”. ¿Cuál es tu mínima distancia de visión distinta?

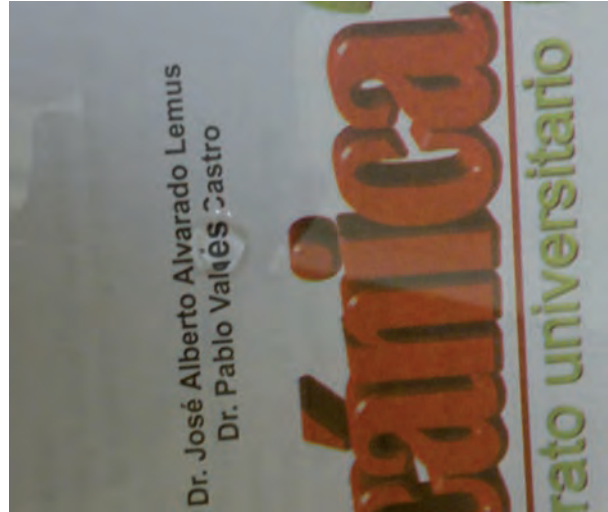


24. Aumento que se obtiene con una lupa.

Traza varias líneas paralelas en una hoja de papel blanco a 0.50 cm unas de otras y observa las líneas simultáneamente a través de la lupa y directamente. ¿Cuántas líneas vistas a través de la lupa se ubican en el espacio que ocupan, por ejemplo, 5 líneas vistas directamente? Calcula el aumento que obtienes con la lupa.



25. Gota de agua como lupa. Coloca una gota de agua sobre una lámina de vidrio. Observa algún pequeño objeto a través de ella y del vidrio.



26. El telescopio refractor más simple. El telescopio refractor más simple consta de una sola lente convergente. Consigue una lente de poder convergente 1 - 1.5 dioptrías. ¿Cuál es su distancia focal? Con el brazo extendido, dirige la lente hacia un objeto bien lejano y obsérvalo a través de ella. Para lograr un gran aumento con semejante “telescopio” éste tendría que ser muy largo ¿Por qué? ¿Cómo se resuelve esta dificultad en el telescopio de Kepler?

27. Formación de imágenes en espejos cóncavo y convexo. Observa tu cara reflejada en las partes interior y exterior de la cuchara grande y bien pulida. Compara las características de las imágenes formadas en ambos casos.

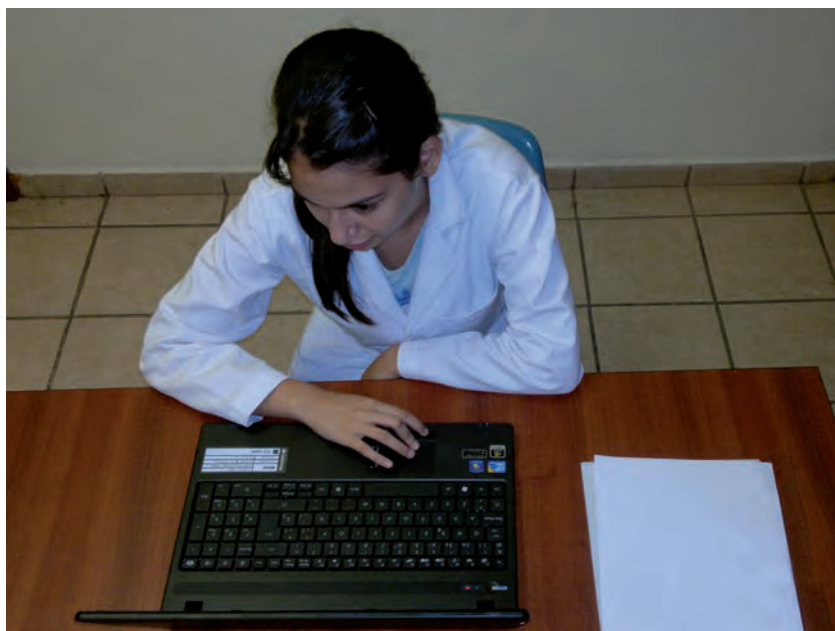




5.2. Prácticas de laboratorio

Las prácticas de laboratorio se caracterizan por la manipulación de diferentes materiales y la realización de mediciones, pero no se reducen a ello. Un aspecto importante es la preparación previa de los estudiantes para el trabajo en el laboratorio. Durante esa preparación deben comprender la problemática que abordarán y el objetivo de la práctica, saber deducir las ecuaciones que utilizarán, así como conocer el contenido del trabajo que van a realizar. No menos importante que lo anterior es la labor posterior a la sesión de trabajo en el laboratorio: la realización de cálculos, el análisis de la incertidumbre de los resultados, las respuestas a las preguntas formuladas y, por supuesto, la elaboración del informe o reporte de la práctica.

El informe de cada práctica debe estar formado por tres partes fundamentales: una, donde se exponen la problemática abordada en la práctica y su objetivo; otra, donde se realiza el esquema de la situación estudiada, se reportan los resultados de las mediciones realizadas, se analiza el origen de la posible incertidumbre de ellos y se responden las preguntas formuladas; la última parte consiste en unas breves conclusiones donde se hace una valoración de los resultados obtenidos y del procedimiento empleado y se proponen variantes para mejorar el trabajo.



Para la mayoría de las prácticas de Óptica que se incluyen se requerirá oscurecer el laboratorio lo más que se pueda. Ello facilitará la realización de las observaciones y mediciones.



5.2.1. Característica voltampérica de un resistor. Ley de Ohm

Materiales e instrumentos: fuente, resistor, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito. 2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

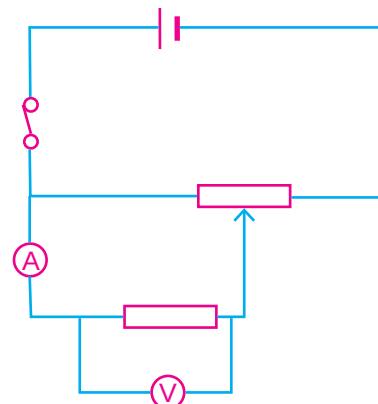
La dependencia entre la intensidad de corriente I en un dispositivo y el voltaje V entre sus terminales se denomina **característica voltampérica** del dispositivo. Si esta dependencia es de proporcionalidad, como por ejemplo para un conductor metálico cuya temperatura no varía, el dispositivo cumple con la ley de Ohm y se dice que es **óhmico**.



Ohm trabajó con conductores metálicos y fue para tales conductores que estableció la ley que hoy lleva su nombre. La resistencia eléctrica de un dispositivo es $R = V/I$, y como para los dispositivos óhmicos dicho cociente es constante, ello significa que la resistencia eléctrica también lo es. Los dispositivos específicamente diseñados para que cumplan con la ley de Ohm se demoniman **resistores**.

El **objetivo** básico de esta práctica es obtener el gráfico de la característica voltampérica de un resistor y determinar su resistencia eléctrica.

1. Familiarízate con las escalas de los multímetros y prepara uno para medir voltaje y el otro para medir intensidad de corriente. Luego monta el circuito eléctrico según el esquema de la figura. Observa que el potenciómetro se conecta en forma de divisor voltaje. Esto permite variar poco a poco el voltaje en los terminales del resistor, desde un pequeño valor hasta un valor dado.





2. Prepara una tabla de 2 columnas y unas 10 filas, para anotar los valores de voltaje e intensidad de corriente. Gira el botón del potenciómetro, de modo que el voltaje en los terminales del resistor sea 0 V. Realiza mediciones de voltaje e intensidad de corriente, aumentando el voltaje a intervalos de 0.20 V hasta llegar a 2.0 V. Anota los valores de V e I en la tabla.



V (V)	I (A)

3. Introduce los valores de V e I en una hoja de cálculo y construye el gráfico de I en función de V . ¿Es la intensidad de corriente proporcional al voltaje? ¿Se cumple la ley de Ohm? Argumenta.

4. A partir de los valores máximos anotados para V e I , calcula la resistencia eléctrica del resistor y expresa el resultado con su incertidumbre relativa.

V	$u(V)$	$u(V)/V$

I	$u(I)$	$u(I)/I$

Puesto que $R = \frac{V}{I}$, la fórmula para determinar la incertidumbre relativa de R es:

$$\frac{u(R)}{R} = \sqrt{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

El maestro te informará acerca de las incertidumbres del voltaje $u(V)$ y de la intensidad de corriente $u(I)$.

R	$u(R)/R$	$u(R)$

5. Compara el resultado obtenido con el valor de resistencia reportado por el fabricante.



5.2.2. Característica voltampérica del filamento de un bombillo

Materiales e instrumentos: fuente, bombillo de linterna, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

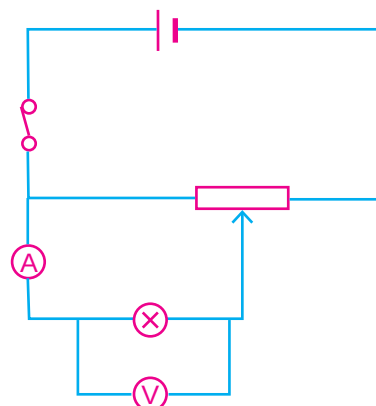
1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito. 2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

En la práctica anterior trabajaste con un resistor, el cual cumple con la ley de Ohm, pero la mayoría de los dispositivos electrónicos modernos no son óhmicos. Incluso el filamento de un bombillo de incandescencia, aún siendo metálico, no cumple con la ley de Ohm, porque al pasar corriente eléctrica por él su temperatura puede elevarse a más de 2 000 °C.



El **objetivo** básico de esta práctica es obtener el gráfico de la característica voltampérica de un bombillo de filamento incandescente.

1. Prepara uno de los multímetros para medir voltaje y el otro para medir intensidad de corriente. Luego monta el circuito eléctrico según el esquema de la figura.





2. Dibuja una tabla de 2 columnas y unas 10 filas, para anotar los valores de voltaje e intensidad de corriente. Gira el botón del potenciómetro, de modo que el voltaje en los terminales del resistor sea 0 V. Realiza mediciones de voltaje e intensidad de corriente, aumentando el voltaje a intervalos de 0.10 V, hasta apreciar una tenue luz en el bombillo. Anota los valores de V e I en la tabla.



V (V)	I (A)

3. Introduce los valores de V e I en una hoja de cálculo y construye el gráfico de I en función de V . ¿Es la intensidad de corriente proporcional al voltaje? ¿Se cumple la ley de Ohm? Argumenta.

4. Utilizando los datos de la tabla, calcula la resistencia eléctrica del bombillo para 1.50 V y luego para el máximo voltaje que mediste. Dispón uno de los multímetros para trabajar como ohmímetro y mide con él la resistencia del filamento del bombillo. ¿Por qué ninguno de los 3 resultados coincide?



5.2.3. Medición de la fem y la resistencia interna de una fuente de energía eléctrica

Materiales e instrumentos: fuente, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.



Medidas de seguridad importantes: 1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito. 2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

Todas las fuentes de energía eléctrica poseen cierta resistencia eléctrica. En particular, en el interior de una pila, las partículas cargadas se mueven contra la resistencia que les presentan los átomos y moléculas entre los que se desplazan. De este modo, cualquier circuito eléctrico tiene una resistencia eléctrica externa a la fuente (R) y otra interna de ella (r).

La fem ε de una fuente representa la energía, por unidad de carga acumulada en sus terminales, que se transforma de algún otro tipo de (química, mecánica, luminosa, etc.), en energía potencial eléctrica. Cuando por el circuito pasa corriente, una parte de ella es utilizada en los diferentes dispositivos del circuito (bombillo, calentador, motor, etc.) y otra parte, Ir , va a parar a energía térmica dentro de la fuente. Si el circuito consta solo de un resistor de resistencia R , entonces en su porción externa la energía transformada es IR . En este caso, el balance entre la energía que entrega la fuente y la que se transforma en energía térmica en su porción externa y en el interior de la pila es:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

Puesto que IR es el voltaje en los terminales del resistor, puede escribirse:

$$\varepsilon = V + Ir$$



De aquí que: $r = \frac{\varepsilon - V}{I}$

A partir de esta ecuación y midiendo la fem ε de la fuente, el voltaje V en los terminales del resistor y la intensidad de corriente I en el circuito, puede determinarse la resistencia interna r de la fuente.

El **objetivo** fundamental de la práctica consiste en determinar la fem y la resistencia interna de una fuente siguiendo el procedimiento descrito. También se evaluará la incertidumbre de los resultados.

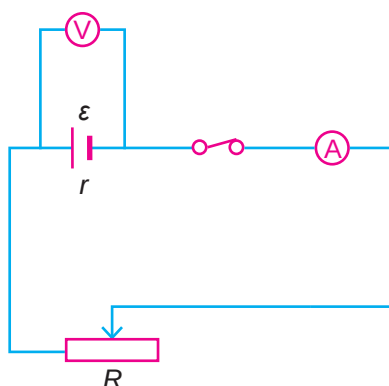
1. La ecuación $\varepsilon = IR + Ir$ puede escribirse $\varepsilon = I(R + r)$. Esto hace evidente que si a los terminales de la fuente conectamos solo un voltímetro, éste mide su fem. En efecto, las resistencias internas de las fuentes suelen ser muy pequeñas comparadas con las de los voltímetros, pueden ser miles y hasta millones de veces menor. Por eso, $r \ll R$ y $\varepsilon \approx IR = V$. Es decir, la fem ε es igual al voltaje V indicado por el voltímetro.

Dispón uno de los multímetros para medir voltaje y mide la fem de la fuente. Expresa el resultado con su incertidumbre, que en este caso es la debida al instrumento. El maestro te informará acerca de ella.

ε	$u(\varepsilon)$	$u(\varepsilon)/\varepsilon$



2. Prepara el otro múltímetro para medir intensidad de corriente y luego monta el circuito según el esquema de la figura. En este caso utilizarás el potenciómetro como resistencia variable, para lo cual conectarás solo dos de sus terminales, el de un extremo y el central.





Gira el botón del potenciómetro hacia la posición de máxima resistencia. Cierra el circuito y observa cómo al girar lentamente el botón del potenciómetro, disminuyendo su resistencia, el voltaje indicado por el voltímetro también va disminuyendo. Ten cuidado de no disminuir demasiado la resistencia del potenciómetro, porque la corriente pudiera llegar a ser tan grande que se rompa. Solo lo harás hasta que el voltaje indicado por el voltímetro disminuya varias décimas de volt. ¿Cómo se explica la diferencia entre la indicación del voltímetro con el interruptor abierto y cerrado?

Mide el voltaje V y la intensidad de corriente I y expresa los resultados con sus incertidumbres. Éstas son las de los instrumentos.

V	$u(V)$	$u(V)/V$

I	$u(I)$	$u(I)/I$

3. Utiliza la ecuación: $r = \frac{\varepsilon - V}{I}$ para determinar la resistencia interna de la pila.

La incertidumbre relativa de r es:

$$\frac{u(r)}{r} = \sqrt{\left(\frac{u(\varepsilon - V)}{\varepsilon - V}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

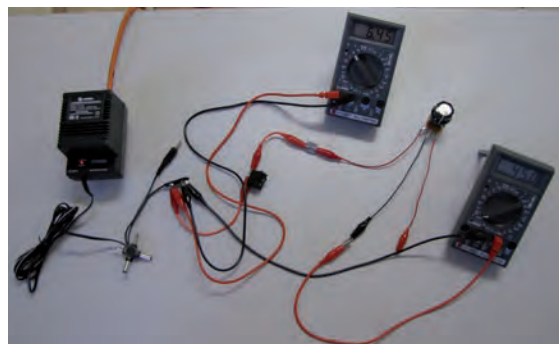
$\varepsilon - V$	$u(\varepsilon - V)$	$u(\varepsilon - V)/(\varepsilon - V)$

Por su parte:

$$u(\varepsilon - V) = \sqrt{(u(\varepsilon))^2 + (u(V))^2}$$

r	$u(r)/r$	$u(r)$

$r = (\quad \pm \quad) \Omega$





Actividad complementaria. Una variante para determinar la resistencia interna consiste en suprimir el amperímetro del circuito anterior y utilizar un resistor de resistencia conocida en lugar del potenciómetro, por ejemplo de 5.6Ω . Nota que en la variante anterior la resistencia del potenciómetro era desconocida. Por eso, para poder determinar la intensidad de corriente I que aparece en la ecuación $r = (\varepsilon - V)/I$ se requirió emplear el amperímetro. Pero ahora no conocemos el valor de I , sino el de R . Transformemos la ecuación de trabajo.

Sustituyendo la expresión $I = \frac{V}{R}$ en la ecuación:

$$r = \frac{\varepsilon - V}{\frac{V}{R}} = \frac{(\varepsilon - V)R}{V}$$

De modo que ahora la ecuación de trabajo es:

$$r = \frac{(\varepsilon - V)R}{V}$$

En este caso:
$$\frac{u(r)}{r} = \sqrt{\left(\frac{u(\varepsilon - V)}{\varepsilon - V}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2}$$

La incertidumbre relativa de R , $\Delta R/R$, es un dato que informa, en porciento, el fabricante del resistor. Para el resistor utilizado esta incertidumbre es mayor que las otras dos que aparecen en la ecuación, por lo que estas últimas pueden no considerarse. De modo que:

$$\frac{u(r)}{r} = \frac{u(R)}{R}$$

ε	$u(\varepsilon)$	$u(\varepsilon)/\varepsilon$

V	$u(V)$	$u(V)/V$

R	$u(R)$	$u(R)/R$

r	$u(r)/r$	$u(r)$

$$r = (\quad \pm \quad) \Omega$$





5.2.4. Medición de la carga del electrón

Fuente, balanza que permita apreciar 0.01 g ó 0.001 g, multímetro, dos láminas de cobre para ser utilizadas como electrodos, interruptor, cables de conexión, solución de sulfato de cobre en agua, calentador eléctrico o plancha y cronómetro.



Medidas de seguridad importantes:

1. Evitar el contacto del sulfato de cobre con la piel y realizar la práctica en un lugar con buena ventilación.
2. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito.
3. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

La corriente eléctrica en los electrólitos conlleva un **transporte de sustancia**. En los electrodos introducidos en la disolución, tiene lugar la separación de las sustancias que forman el electrólito. Si éste es una solución de sulfato de cobre en agua, en el electrodo negativo (cátodo) se deposita cobre. Midiendo la masa de cobre depositada, la intensidad de la corriente y el tiempo durante el cual ésta circula, es posible calcular la carga del electrón.

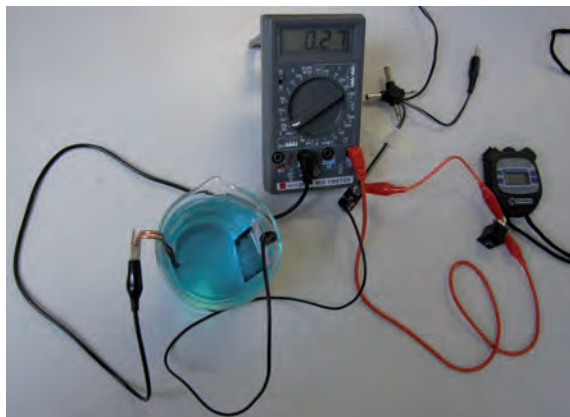
El **objetivo** de la práctica es determinar la carga del electrón, midiendo la intensidad de la corriente eléctrica que se hace pasar por una solución de sulfato de cobre en agua durante cierto tiempo y la masa de cobre que se deposita en el cátodo.

1. Estudia el apartado 2.2.2 y, de modo especial, el ejemplo resuelto 2.7, pues ello te preparará para esta práctica.



2. Limpia bien las láminas de cobre. Mide la masa de la que utilizarás como electrodo negativo (M_1). Dibuja el esquema del circuito eléctrico con todos los componentes en serie: fuente, amperímetro, interruptor y cubeta con los electrodos y la solución. Dispón el multímetro para trabajar como amperímetro.

M_1	$u(M_1)$



3. Realiza las conexiones según el esquema, pero aún sin introducir los electrodos en la solución de sulfato de cobre y cuidando que el electrodo cuya masa mediste sea el negativo.



4. Introduce los electrodos en la solución. Ajusta el voltaje de la fuente para que la intensidad de corriente en el circuito esté en el rango 0.25 A - 0.30 A. Deja pasar corriente durante unos 25 min. Debes medir este tiempo. Estima la incertidumbre en el valor de la intensidad de corriente en el circuito.

I	$u(I)$	$u(I)/I$

t (s)

5. Extrae la lámina de cobre utilizada como cátodo, sécala colocándola sobre una hornilla o plancha caliente y mide nuevamente su masa (M_2). Calcula la masa de cobre depositada en la lámina ($M = M_2 - M_1$) y expresa el resultado con su incertidumbre.

M_2	$u(M_2)$

M	$u(M)/M$	$u(M)$

La incertidumbre de M es:

$$u(M) = \sqrt{[u(M_2)]^2 + [u(M_1)]^2}$$

$$M = (\quad \pm \quad) \text{ kg}$$



6. Para determinar la carga del electrón utiliza la fórmula:

$$e = \frac{mIt}{nM}$$

En esta fórmula, m es la masa de un átomo de cobre (1.05×10^{-25} kg), n su valencia (2), I la intensidad de corriente, t el tiempo durante el cual estuvo circulando y M la masa de cobre depositada.

7. Calcula las incertidumbres relativa y absoluta del resultado. En este caso la fórmula para la incertidumbre relativa es:

$$\frac{u(e)}{e} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2}$$

Sin embargo, las incertidumbres relativas en los resultados de las mediciones de la intensidad de corriente y de la masa de cobre depositada son mucho mayores que las otras. Por eso, despreciando el primer y tercer término del radicando queda:

$$\frac{u(e)}{e} = \sqrt{\left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2}$$

e	$u(e)/e$	$u(e)$

$e = (\text{_____} \pm \text{_____}) \text{ C}$

8. Compara el resultado obtenido con el valor reconocido para la carga del electrón.



5.2.5. Conexión de conductores en serie y en paralelo. Acoplamiento de circuitos simples

Materiales e instrumentos: fuente, resistores (2), multímetros (2), interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito.
2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.



Dos de la formas más simples de conectar los dispositivos en los circuitos son las denominadas en **serie** y en **paralelo** (Fig. 2.33). En la primera, la intensidad de corriente es la misma en todos los dispositivos y el voltaje en los extremos del circuito es igual a la suma de los voltajes en los terminales de cada uno de ellos. En la segunda, el voltaje es el mismo en los terminales de todos los dispositivos y la intensidad de corriente en la parte no ramificada del circuito es igual a la suma de las intensidades en cada uno de ellos.

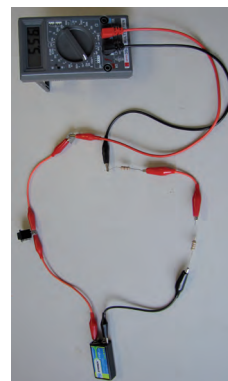
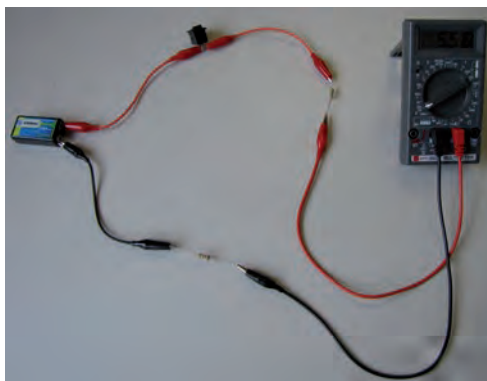
El **objetivo** de la práctica es verificar las características de las conexiones en serie y paralelo en el caso de dos resistores.

Conexión en serie.

1. Dispón uno de los multímetros para medir intensidad de corriente y el otro para medir voltaje. Dibuja el esquema del circuito con la fuente, el amperímetro y el interruptor en serie.



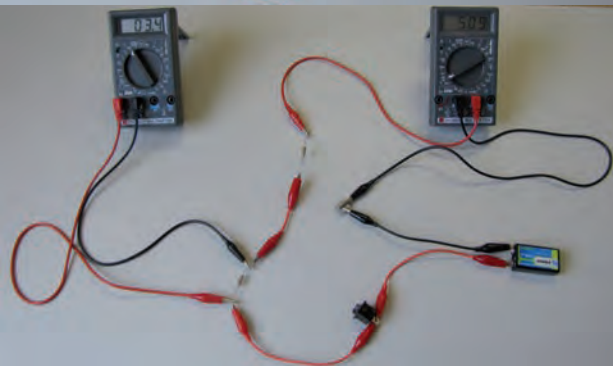
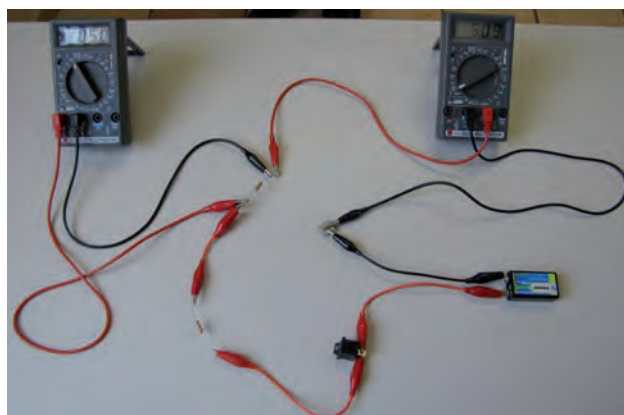
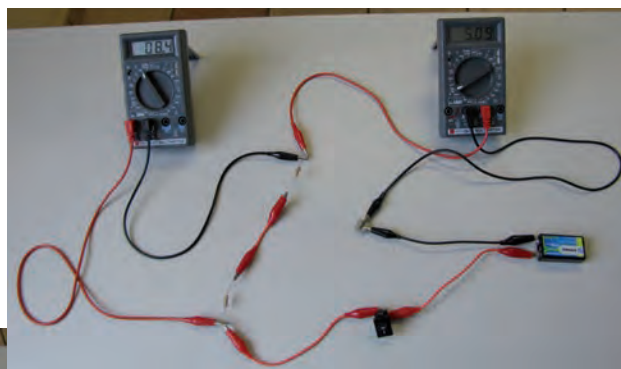
2. Realiza la conexión según el esquema y mide la intensidad de corriente. Cambia el amperímetro de posición y comprueba que la intensidad de corriente es la misma en todas las porciones del circuito.



$I(A)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$

3. Mide el voltaje entre los extremos del circuito y en los terminales de cada resistor y comprueba que:

$$V = V_1 + V_2$$



$V(V)$	$V_1(V)$	$V_2(V)$

4. A partir de los datos anteriores y utilizando la ley de Ohm, calcula la resistencia total del circuito y la de cada uno de los resistores y comprueba las siguientes ecuaciones:

$$R = R_1 + R_2$$

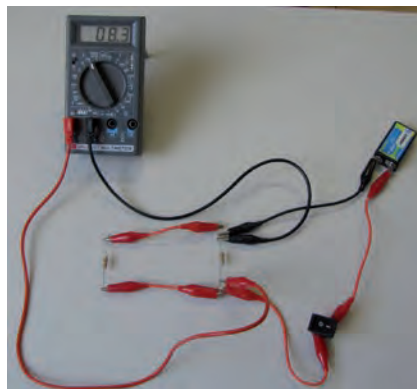
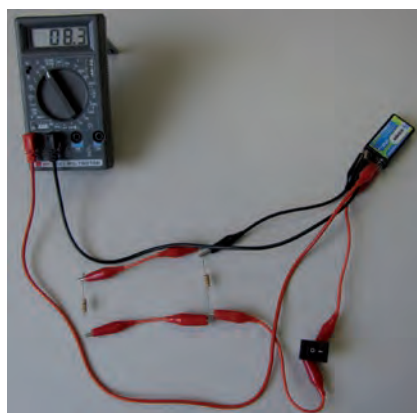
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$R(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$

¿Cómo están conectados los bombillos de una guirnalda de Navidad? ¿Por qué?

Conexión en paralelo.

5. Ahora dibuja el esquema del circuito con la fuente y el interruptor en serie pero los dos resistores en paralelo.



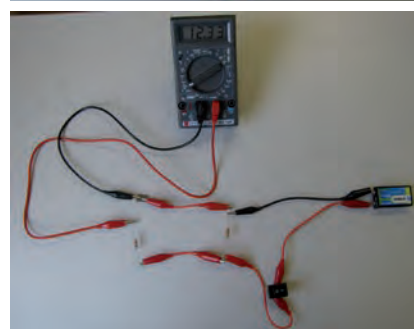
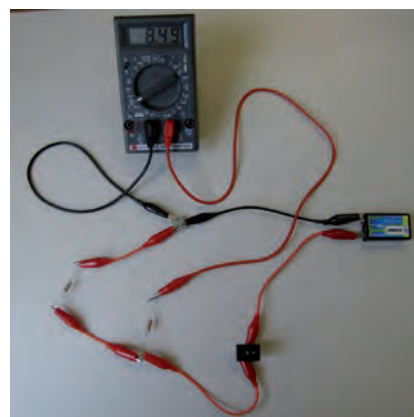
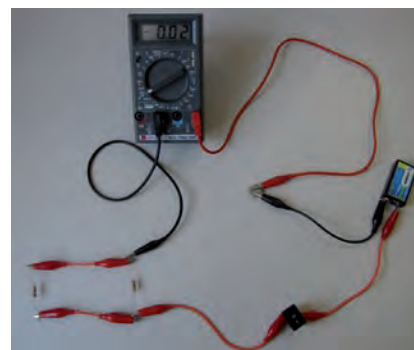
6. Realiza la conexión según el esquema y comprueba que el voltaje es el mismo al conectar directamente el voltímetro a los terminales de cada uno de los resistores y de la fuente.



$V(V)$	$V_1(V)$	$V_2(V)$



7. Intercala el amperímetro en el circuito y mide la intensidad de corriente en su parte no ramificada y en cada una de los resistores. Comprueba que $I = I_1 + I_2$.



$I \text{ (A)}$	$I_1 \text{ (A)}$	$I_2 \text{ (A)}$

8. A partir de los datos anteriores y utilizando la ley de Ohm, calcula la resistencia total del circuito (No es necesario calcular las resistencias de los resistores, pues ya lo has hecho en la actividad 4).

$R \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_1 \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_2 \text{ (}\Omega\text{)}$

9. Comprueba las siguientes ecuaciones:

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

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

¿Cómo están conectados los consumidores de energía eléctrica en una casa? ¿Por qué?



5.2.6. Propagación de la luz

Introducción. En los medios homogéneos la luz se propaga en línea recta y en los no homogéneos puede desviarse de la propagación rectilínea. El medio que nos rodea en su conjunto es no homogéneo, está repleto de objetos que poseen las más diversas propiedades, los cuales actúan sobre la luz desviándola de la propagación rectilínea. Sin embargo, determinadas regiones, consideradas por separado, son aproximadamente homogéneas. De ahí que una serie de fenómenos ópticos pueden ser explicados asumiendo que la luz se propaga en línea recta.

El **objetivo** de esta práctica es familiarizarse con fenómenos que evidencian la propagación rectilínea de la luz.

Materiales e instrumentos: dos bombillos tipo de linterna; fuente de corriente y cables de conexión para encender los bombillos; pequeña caja; diafragma con abertura en forma de letra *L* (la abertura se cubre con material traslúcido, para lo cual puede servir el material de algunas bolsas de las empleadas en las tiendas); lámpara para iluminar el diafragma con la letra *L*; diafragma con un orificio de 2-3 mm de diámetro; banco óptico; jinetillos para fijar los dispositivos al banco óptico; pantallas opaca y traslúcida; cinta métrica.



1. Formación de sombra y de penumbra.

Coloca un bombillo sobre la mesa y a cierta distancia de él sitúa la pequeña caja. Enciende el bombillo y obtén la sombra de la caja en la pantalla. Describe cómo varía su tamaño al variar la posición de la caja y de la pantalla. Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar lo observado.





Explica a partir del resultado anteriormente obtenido, por qué al colocar un objeto, por ejemplo este libro, debajo de una lámpara fluorescente, la sombra que se forma no tiene bordes definidos.

Ahora sitúa un segundo bombillo al lado del primero. Observa la sombra cuando enciendes cada bombillo por separado y luego cuando están los dos encendidos. Localiza en la pantalla las zonas de sombra y de penumbra. Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar el fenómeno.



2. Formación de imágenes mediante un orificio.

Fija el diafragma con la abertura en forma de *L* a la lámpara y sitúa ésta en un extremo del banco óptico. A unos 10 cm del diafragma con la letra, sitúa el diafragma que tiene el pequeño orificio. Localiza la imagen de la letra *L* en la pantalla translúcida. ¿Cómo es la imagen, derecha o invertida, mayor o menor que la letra? Describe cómo cambia su tamaño al acercar o alejar el diafragma con el orificio al diafragma con la letra *L*.



Realiza un esquema de la situación y traza los rayos que permitan explicar lo observado. Señala en el esquema las longitudes H_o de la letra y H_i de su imagen en la pantalla, y las distancias d_o del orificio a la letra y d_i del orificio a su imagen.

Mide H_o , H_i , d_o y d_i y anota los resultados y la incertidumbre de ellos.

Calcula el aumento $A = \frac{H_i}{H_o}$ y su incertidumbre. Para determinar la incertidumbre utiliza la fórmula:

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(H_i)}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{u(H_o)}{H_o}\right)^2}$$

También calcula el cociente $\frac{d_i}{d_o}$ y su incertidumbre.

Compara los resultados obtenidos para ambos cocientes.



5.2.7. Segunda ley de la refracción

Introducción. Desde antes de nuestra era ya era conocido que la luz puede desviarse al pasar de un medio a otro, e incluso se habían realizado mediciones de ángulos de incidencia y refracción. No obstante, fue solo en 1621 que Willebrord Snell, matemático holandés, encontró un modo de relacionar analíticamente dichos ángulos. Más tarde Descartes expresó esa relación en la forma que hoy la conocemos. Tal relación entre los ángulos de incidencia y de refracción cuando un haz de luz incide en la superficie de separación entre dos medios transparentes se denomina segunda ley de la refracción y también, en honor a Willebrord Snell, ley de Snell:

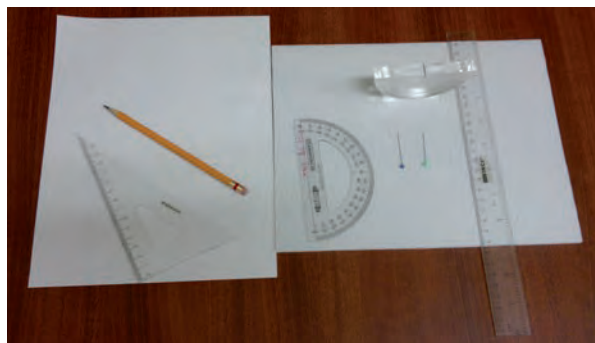
$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r$$

donde n_1 y n_2 son números, denominados índices de refracción, los cuales caracterizan desde el punto de vista óptico a los medios: n_1 al medio desde el que incide la luz y n_2 al medio que pasa la luz.

El índice de refracción del vacío se define como 1 y los índices de refracción de otros medios se miden con relación a él. El índice de refracción del aire es prácticamente 1.

El **objetivo** fundamental de la práctica es verificar el cumplimiento de la segunda ley de la refracción y determinar el índice de refracción de cierto material.

Materiales e instrumentos: cuerpo de plástico (o de vidrio) de forma semicircular, transportador, regla, dos alfileres, hoja de papel, pedazo de cartón.



1. Repasa el apartado 3.2.1 del libro.
2. En el centro del lado recto del cuerpo semicircular realiza con un marcador un fino trazo, perpendicular a las caras planas del cuerpo. Coloca el pedazo de cartón en la mesa y encima de él la hoja de papel. Utilizando la regla y el transportador, traza en la hoja dos líneas que se crucen y sean perpendiculares entre sí. A continuación



traza líneas que partan de la intersección de las dos primeras y formen ángulos de 10° , 20° , 30° y 40° con una de ellas. Sitúa el cuerpo semicircular sobre el papel de modo que su borde recto quede alineado con una de las líneas. Asegúrate que el trazo realizado en el cuerpo semicircular quede junto al punto de intersección de las líneas.

2. Clava un alfiler a 3-4 cm del borde recto del cuerpo semicircular, justamente frente al trazo realizado en él. ¿Cuál es el ángulo de incidencia de un rayo de luz que procedente del alfiler incide sobre el trazo? Clava el segundo alfiler cerca del borde semicircular del cuerpo, de modo que se vea alineado con la imagen de primero y el trazo realizado en el cuerpo. ¿Cuál es el ángulo de refracción correspondiente al rayo que procede del primer alfiler?

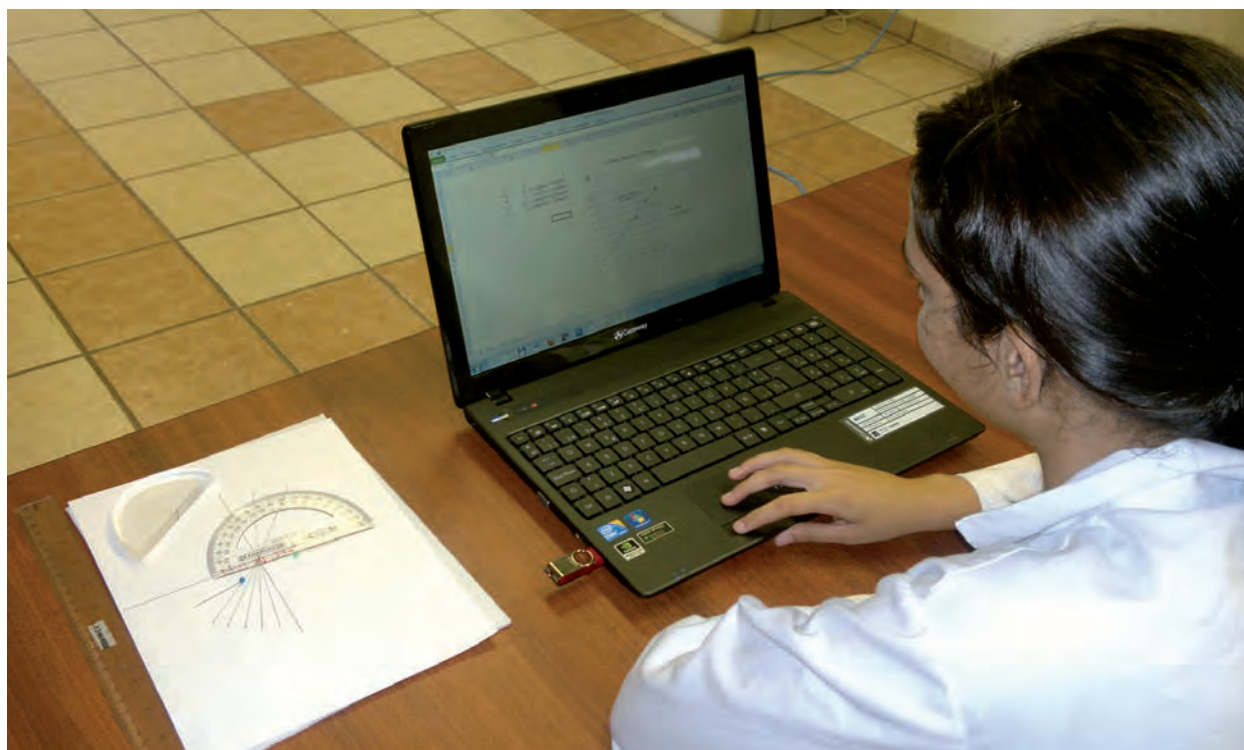


Ahora desplaza el primer alfiler para que el ángulo de incidencia del rayo que llega al trazo sea 10° . Nuevamente coloca el segundo alfiler de tal modo que se vea alineado con la imagen del primero y con el trazo. Realiza una marca en la posición del alfiler. Repite la operación para ángulos de incidencia de 20° , 30° y 40° . Después traza líneas que pasen por las marcas realizadas y vayan hasta el punto de intersección de las otras.



3. Mide los ángulos de refracción correspondientes a cada ángulo de incidencia y construye una tabla de 6 columnas: i , r , $\text{sen } i$, $\text{sen } r$, i/r y $\text{sen } i/\text{sen } r$. ¿Qué conclusión puedes extraer de los datos de la tabla? Halla el valor medio de los valores obtenidos para el cociente $\text{sen } i/\text{sen } r$. ¿Cuál es el índice de refracción del material del cuerpo semicircular?

4. Utilizando una computadora, en un mismo sistema de ejes coordenados construye los gráficos de i vs. r y de $\text{sen } i$ vs. $\text{sen } r$. Haz que el software coloque la ecuación correspondiente al gráfico $\text{sen } i$ vs. $\text{sen } r$ en la pantalla. ¿Qué forma tienen los gráficos? ¿Cuál es el índice de refracción que se obtiene a partir de este procedimiento? ¿Son coherentes estos resultados con los del punto 3?





5.2.8. Formación de imágenes mediante una lente convergente

Introducción. La formación de imágenes mediante lentes convergentes es parte esencial del funcionamiento del ojo humano y de útiles instrumentos ópticos como la cámara fotográfica, la lupa, el microscopio y el telescopio refractor, entre otros. Si el objeto está situado a una distancia de la lente mayor que su distancia focal, la imagen es real y si está a una distancia de ella menor que la distancia focal, la imagen es subjetiva, virtual.

Una característica importante de los instrumentos ópticos mencionados es el aumento o amplificación que se obtiene mediante ellos. En las imágenes reales dicho aumento se denomina **aumento lineal** y se calcula como el cociente entre el tamaño de la imagen H_i y el tamaño del objeto H_o , es decir:

$$A = \frac{H_i}{H_o}$$

Puede demostrarse (véase la figura 3.23 del libro de texto) que el aumento lineal también es igual al cociente entre la distancia d_i de la lente a la imagen y la distancia d_o de la lente al objeto, o sea:

$$A = \frac{d_i}{d_o}$$

Cuando la lente se utiliza como lupa, el objeto que se observa se sitúa entre la lente y el foco. En este caso la imagen no es real, sino subjetiva y el aumento está dado por la razón entre el tamaño de la imagen formada en la retina al mirar sin la lente a la distancia mínima a que el ojo puede enfocar cómodamente y su tamaño en la retina al mirarlo a través de la lente. Como el tamaño de la imagen en la retina está determinado por el ángulo bajo el cual se observa el objeto, este aumento se denomina **aumento angular**. Dicho aumento puede ser evaluado mirando simultáneamente al objeto sin lupa y con ella y comparando los tamaños de las imágenes que se forman en ambos casos.

El **objetivo** de esta práctica es estudiar la formación de imágenes mediante una lente convergente y determinar el aumento lineal de una imagen real obtenida con ella y el aumento angular al utilizarla como lupa.

Materiales e instrumentos: lente convergente (sirve una lupa); diafragma con una abertura en forma de letra L (la abertura se cubre con material traslúcido, para lo cual puede servir el material de algunas bolsas de las empleadas en las tiendas); lámpara para iluminar el diafragma con la letra L; pantalla; cinta métrica; cinta adhesiva.





1. Repasa el apartado 3.4.1 del libro de texto, en particular lo relativo a la cámara fotográfica, el ojo humano y la lupa.
2. Ensaya la formación de imágenes reales mediante una lente convergente.

Fija el diafragma con la abertura en forma de L a la lámpara y sitúa ésta en un extremo de la mesa. A cierta distancia coloca la lente y localiza la imagen de la letra L en la pantalla. ¿Cómo es la imagen, derecha o invertida? Describe cómo cambian su posición y tamaño al acercar o alejar la lente a la letra L .

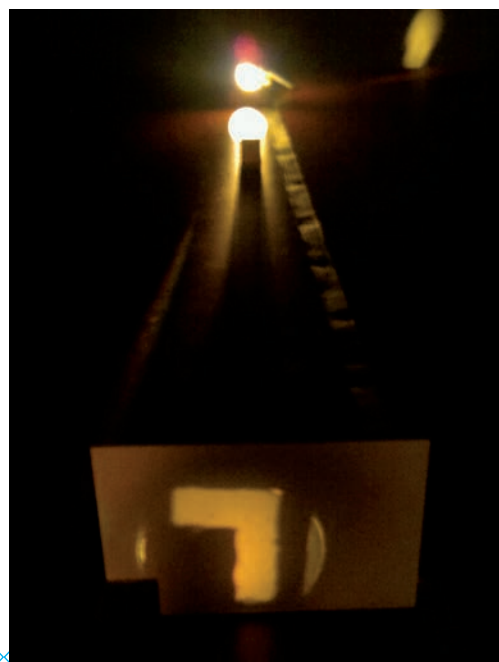
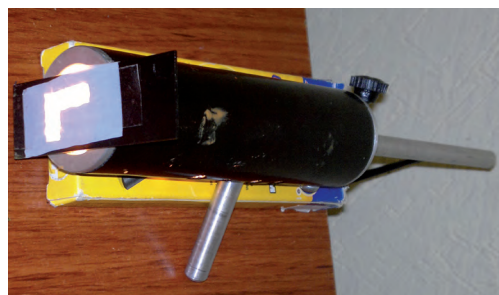


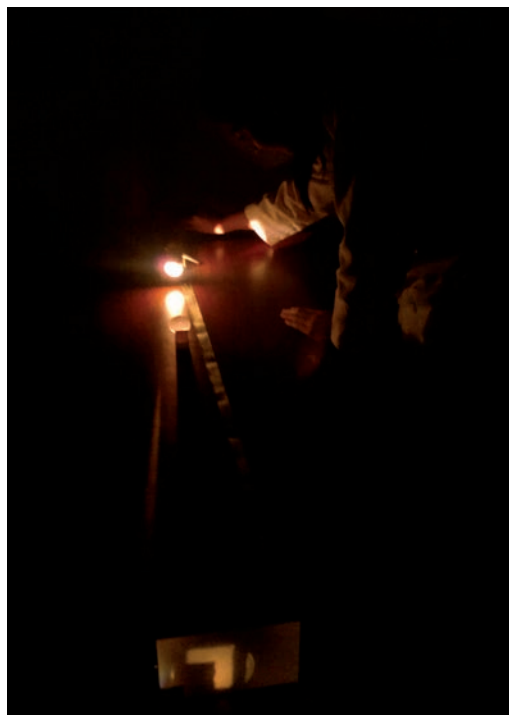
Realiza un esquema de la situación y traza los rayos característicos que permitan explicar lo observado.

3. Determina el aumento de una imagen real obtenida con la lente convergente.

Extiende la cinta a lo largo de la mesa, de modo que el cero de su escala quede junto a la letra L . Para que la cinta métrica no se mueva, puedes fijarla a la mesa utilizando trozos de cinta adhesiva. Sitúa la lente y la pantalla junto a la cinta métrica, a cierta distancia una de la otra y de la letra L . Obtén la mayor imagen que puedas de la letra, sin que la pantalla sobrepase el extremo de la cinta. Asegúrate que la imagen esté bien enfocada.

Mide la longitud H_o de la letra L , la longitud H_i de su imagen en la pantalla, la distancia d_o de la lente a la letra y la distancia d_i de la lente a la imagen y anota los resultados con sus incertidumbres. Presta atención a que en la incertidumbre al medir d_i interviene no solo el mero acto de medición, sino además el hecho de que no es posible establecer





con exactitud la posición de la pantalla para la cual se obtiene la imagen más nítida.

Calcula el aumento lineal $A = H_i/H_o$ y escribe el resultado con su incertidumbre. Para determinar ésta utiliza la fórmula:

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(H_i)}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{u(H_o)}{H_o}\right)^2}$$

También calcula el cociente d_i/d_o y su incertidumbre.

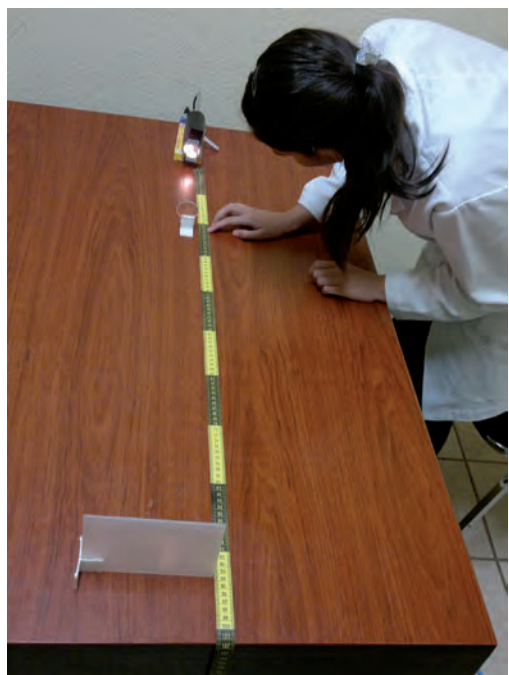
Compara los resultados obtenidos para ambos cocientes.

4. Analiza la formación de imágenes mediante una lente utilizada como lupa.

Observa las letras de este texto con la lente. Primeramente sostienes la lente muy cerca de las letras y después la alejas lentamente hasta que la imagen comience a perder nitidez. ¿La imagen que se forma de las letras es real o virtual? ¿Cuál es la posición de las letras relativa al foco de la lente? Observa las letras primero con el ojo cerca de la lupa y después lejos de ella. ¿Qué características diferencian a las imágenes en uno y otro caso?

5. Determina el aumento de la lente utilizada como lupa.

Traza varias líneas paralelas en una hoja de papel blanco, a 0.50 cm unas de otras. Simultáneamente observa las líneas a través de la lupa y directamente. ¿Cuántas líneas vistas a través de la lupa se ubican en el espacio que ocupan, por ejemplo, 4 líneas vistas directamente? Calcula el aumento que obtienes con la lupa.



Electricidad y Óptica

Bachillerato universitario

