Enseñando Física

Material de apoyo para profesores de secundaria

María Luisa Marquina Fábrega
Raúl Arturo Espejel Morales
Coordinadores

Serie Enseñando Ciencias

Enseñando Física

Material de apoyo para profesores de secundaria

Serie Enseñando Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

Rector
Enrique Graue Wiechers

Secretario General
Leonardo Lomelí Vanegas

Coordinador de la Investigación Científica
William Lee Alardín

Directora General de la Facultad de Ciencias
Catalina Stern Forgach

Academia Mexicana de Ciencias

Presidente
José Luis Morán López

Vicepresidente
Estela Susana Lizano Soberón

Tesorera
María Ester Brandan

Secretarios
Carlos Artemio Coello Coello
Alipio Gustavo Calles Martínez

Enseñando Física

Material de apoyo para profesores de secundaria

Autores

Raúl Arturo Espejel Morales
Facultad de Ciencias, UNAM

María Luisa marquina Fábrega
Facultad de Ciencias, UNAM

José Luis Morán López
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica

Marco Antonio Martínez Negrete

Miguel Núñez Cabrera

Coordinación general
Rosaura Ruiz Gutiérrez

Coordinación académica
Alfredo Arnaud Bobadilla

Coordinación editorial
Rosanela Álvarez Ruiz

Asistencia académica
Daniela Franco Bodek

Diseño y formación digital
Intidrinero, S. A. de C. V.

Diseño de portada
Miguel Marín

Corrección
Paula Buzo Zarzosa

Enseñando Física. Material de apoyo para profesores de secundaria.
1.ª edición, 2020.

D. R. © febrero, 2020.
Universidad Nacional Autónoma de México
Secretaría General
Facultad de Ciencias
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México

D. R. © febrero, 2020.
Academia Mexicana de Ciencias
Casa Tlalpan, Calle Cipreses s/n, km 23.5 Carretera Federal México-Cuernavaca,
San Andrés Totoltepec, Tlalpan, 14400, Ciudad de México

ISBN:

Hecho en México

Índice

Presentación 11
Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Presentación 13
Dra. Catalina Stern Forgach

Presentación serie "Enseñando ciencias" 15
Dr. José Luis Morán

Prólogo 17
Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez

Introducción al libro *Enseñando Física* 19
Dr. Alfredo Arnaud Bobadilla

BLOQUE 1.
La descripción del movimiento y la fuerza 21
¿Cómo se sabe que algo se mueve? 22
Marco de referencia y trayectoria; diferencia entre desplazamiento y distancia recorrida 26
Velocidad: desplazamiento, dirección y tiempo 29
¿Qué son la rapidez y velocidad de un objeto? 30
Interpretación y representación de gráficas posición-tiempo 33
Movimiento ondulatorio, modelo de ondas y explicación de características del sonido 40
Explicaciones de Aristóteles y Galileo acerca de la caída libre 51
Aportación de Galileo en la construcción del conocimiento científico 58
La aceleración, diferencia con la velocidad 60
Interpretación y representación de gráficas: velocidad-tiempo y aceleración-tiempo 61
La fuerza, resultado de las interacciones por contacto (mecánicas) y a distancia (magnéticas y electrostáticas) y su representación con vectores 67
Interacciones por contacto 68
Interacciones a distancia 68
La idea cotidiana de fuerza 71
El concepto de fuerza: el resultado de las interacciones 72

Fuerza resultante, métodos gráficos de suma vectorial 75
Equilibrio de fuerzas: uso de diagramas 79

BLOQUE 2.
Leyes del movimiento 81
Primera ley de Newton: el estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme 81
La inercia y su relación con la masa 81
Segunda ley de Newton: relación fuerza, masa y aceleración 84
El newton como unidad de fuerza 84
Tercera ley de Newton: la acción y la reacción; magnitud y sentido de las fuerzas 86
Efectos de las fuerzas en la Tierra y en el universo 87
Gravitación. Representación gráfica de la atracción gravitacional. Relación con caída libre y peso 87
Leyes de Kepler 89
El campo gravitatorio 90
Aportación de Newton a la ciencia: explicación del movimiento en la Tierra y en el universo 91
Las fases de la Luna 91
Los eclipses 92
Viajes interplanetarios 94
La energía y el movimiento 95
La conservación de la cantidad de movimiento o ímpetu 96
La energía cinética 97
Energía potencial 100

BLOQUE 3.
Un modelo para describir la estructura de la materia 103
Los modelos en la ciencia 103
Características e importancia de los modelos en la ciencia 103
Ideas en la historia acerca de la naturaleza continua y discontinua de la materia: Demócrito, Aristóteles y Newton; aportaciones de Clausius, Maxwell y Boltzmann 105
Aspectos básicos del modelo cinético de partículas: partículas microscópicas indivisibles, con masa, movimiento, interacciones y vacío entre ellas 109
La estructura de la materia a partir del modelo cinético de partículas 109
Las propiedades de la materia: masa, volumen, densidad y estados de agregación 109
Presión: relación fuerza y área; presión en fluidos. Principio de Pascal 111
Presión hidrostática y principio de Pascal 115
Principio de Arquímedes 121
Gasto. Ecuación de continuidad 127
Ecuación de Bernoulli. Tubo de Venturi 131

¿Cómo funcionan los gatos hidráulicos? 136
Temperatura y sus escalas de medición 137
Nociones preliminares sobre temperatura, paredes adiabáticas y diatérmicas 138
Energía interna, calor, equilibrio térmico 141
Construcción de un termómetro 147
Ley cero o de transitividad de la termodinámica 149
El termómetro de gas a volumen constante y la lectura "correcta" de la temperatura de un objeto 150
Calor, transferencia de calor y procesos térmicos: dilatación y formas de propagación 154
Ecuación de estado de un "gas muy diluido", gas ideal o gas perfecto 154
Leyes de Boyle-Mariotte y Gay Lussac-Charles 155
Conservación de la energía 159
Capacidad térmica 160
Capacidad térmica específica 162
Medición del calor 163
Capacidad térmica molar 164
Formas del calor: conducción, convección y radiación 165
Cambios de estado; interpretación de gráfica de presión-temperatura 168
Cambios de estado 168
Energía calorífica y sus transformaciones 172
Transformación de la energía calorífica 172
Primera ley de la termodinámica 173
Los motores térmicos en la historia. Newcomen y Watt 175
Potencia y trabajo de los motores térmicos 177
El "caballo de potencia" y la empresa de Boulton-Watt 178
Implicaciones de la obtención y aprovechamiento de la energía en las actividades humanas 180
Degradación de la energía 180
Desarrollo sustentable 180
Uso lineal y cíclico de los recursos exergéticos 181
Huella ecológica 182
Consumo de recursos energéticos agotables 184
Los energéticos renovables 184
Ecoaldeas y ecomunicipios 186

BLOQUE 4.
Manifestaciones de la estructura interna de la materia 189
Explicación de los fenómenos eléctricos: el modelo atómico 189
Proceso histórico del desarrollo del modelo atómico: aportaciones de Thomson, Rutherford y Bohr; alcances y limitaciones de los modelos 189

Características básicas del modelo atómico: núcleo con protones y neutrones, y electrones en órbitas. Carga eléctrica del electrón 190
Radiactividad 192
Núcleo Atómico 193
Efectos de atracción y repulsión electrostáticas 194
Ley de Coulomb 197
Campo eléctrico 198
Potencial eléctrico 200
Corriente y resistencia eléctrica. Materiales aislantes y conductores 201
Circuitos 202
Potencia eléctrica 205
Nociones de electromagnetismo 205
Campo magnético 205
Los fenómenos electromagnéticos y su importancia 207
Descubrimiento de la inducción electromagnética: experimentos de Oersted y de Faraday 207
El electroimán y aplicaciones del electromagnetismo 208
Generación de un campo magnético por una corriente eléctrica 208
¿Cómo se genera la corriente eléctrica que llega a las casas? 211
¿Qué son y para qué sirven los transformadores que están afuera de las casas? 213
Composición y descomposición de la luz blanca 215
Fuentes de luz 216
Luz, color y sombras 216
Características del espectro electromagnético y espectro visible: velocidad, frecuencia, longitud de onda y su relación con la energía 217
Aplicaciones de las ondas electromagnéticas 219
La luz como onda y partícula 219
El arco iris, un fenómeno óptico espectacular 221
Tópicos de óptica geométrica 224
Reflexión de la luz en espejos planos 225
Imágenes en espejos curvos 226
Refracción de la luz. Ley de Snell 228
Formación de imágenes con una lente delgada biconvexa 232

BLOQUE 5.
Conocimiento, sociedad y tecnología 241
El universo 241
Teoría de "La gran explosión"; evidencias que la sustentan, alcances y limitaciones 241
Características de los cuerpos cósmicos: dimensiones, tipos; radiación electromagnética que emiten, evolución de las estrellas; componentes de las galaxias, entre otras. La Vía Láctea y el Sol 255

Interacción de la tecnología y la ciencia en el conocimiento del universo 258
La tecnología y la ciencia en los estilos de vida actual 259
Física y ambiente 262
¿Crisis de energéticos? ¿Qué se puede hacer para contribuir al cuidado del ambiente? 264
Ciencia y tecnología en el desarrollo de la sociedad 275

Presentación

Estimados maestros y maestras:

Quisiera, en primer lugar, destacar que su labor como docentes de Educación Básica es de enorme relevancia, toda vez que están trabajando con los niños y jóvenes en la construcción de los conocimientos, de una estructura mental, de las habilidades y las aptitudes que les permitirán convertirse en ciudadanos, futuros profesionistas y protagonistas en la toma de decisiones y resolución de los grandes retos del país.

Consciente de su papel como Universidad Nacional, y preocupada por la educación en todos sus niveles educativos, la UNAM, a través de esta Secretaría General, y la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) han combinado sus esfuerzos para preparar esta serie "Enseñando ciencias", compuesta de cuatro libros dirigidos particularmente a profesores de secundaria de las asignaturas de Biología, Física, Matemáticas y Química.

Para la realización de esta serie, nos hemos dado a la tarea de reunir a equipos de profesores e investigadores de amplia experiencia universitaria, con el fin de diseñar y elaborar estos materiales, cuyo objetivo es proporcionar a nuestros colegas profesores elementos valiosos en los ámbitos disciplinar y metodológico, y con ellos coadyuvar a preservar una educación de calidad, basada en el rigor, la constancia, el compromiso y el manejo de conceptos que cuentan con el sustento de la investigación científica de vanguardia que se realiza en las aulas y laboratorios universitarios.

Me congratulo, pues, de poner a disposición de los profesores de secundaria de nuestro país y de cualquier docente de habla hispana, estos materiales que seguramente serán perfectibles, pero que también representarán, estoy seguro, una oportunidad de contrastar ideas y proseguir con este diálogo continuo que motiva la adquisición y actualización permanente de nuestros conocimientos, mismos que irán en beneficio de los alumnos.

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General de la UNAM

Presentación

Estimados colegas:

Como parte de las tareas fundamentales que tiene la Facultad de Ciencias en el ámbito de la formación, la investigación y de la divulgación científica, me es grato presentar este libro que forma parte de la serie "Enseñando ciencias".

Este texto, dirigido a profesores de secundaria, constituye uno más de los apoyos con los que podrán contar los maestros para diseñar y dirigir sus actividades diarias; sobre todo, ha de verse como un libro de referencia para su labor docente, en tanto aporta recomendaciones didácticas, actividades y contenido disciplinar adaptados al ciclo de secundaria, pero pensando al mismo tiempo en ofrecer mayores elementos y recursos: un panorama más completo y profundo de su disciplina.

La participación de la Facultad de Ciencias en este libro da cuenta del interés por contribuir en la permanente y ardua labor de formar individuos del siglo XXI responsables, informados, críticos, comprometidos con su sociedad y con el ambiente, y preocupados por sumarse al desarrollo de este país. Pero ese desarrollo, que hasta hace apenas unas décadas dependía de la industrialización y de la mecanización de los procesos, el día de hoy y hacia el futuro cercano exigirá cada vez más de profesionales en el ámbito de la biotecnología, la física y las matemáticas, capaces de actuar y pensar en el terreno de la interdisciplina, de la ciencia de datos y de la complejidad.

En este marco, resulta indispensable despertar vocaciones científicas desde temprana edad, fomentar el pensamiento complejo y apostar por la alfabetización científica con el fin de contar con una masa crítica extendida que sepa tomar decisiones bien informadas en lo individual y para su sociedad; que pueda prevenir, anticipar e identificar posibles problemas, afectaciones y amenazas, pero también oportunidades y beneficios.

Por lo anterior, sostengo que la educación es una enorme responsabilidad que debe tomarse con la seriedad y con toda la dedicación que merece ya que es el único recurso con el que realmente cuenta una sociedad para crecer, desarrollarse, vivir en armonía, ser justa, equitativa y productiva.

Quisiera, en este sentido, agradecer la dedicación y esfuerzo de los profesores de la Facultad de Ciencias, de la UNAM y de la Academia Mexicana de las Ciencias, por darse el tiempo de reflexionar, trabajar su disciplina a un nivel que no es en el que desarrollan cotidianamente su labor docente; por esforzarse, por plantearse continuamente retos, por preocuparse en difundir los temas que los apasionan y por estar siempre dispuestos al diálogo, a la discusión constructiva y, sobre todo, por contribuir a que los jóvenes se acerquen a la ciencia en un momento en el que nos es tan necesaria.

Y a ustedes, estimados maestros y maestras, agradezco el trabajo que realizan día a día, no sólo para educar, sino para formar a nuestros jóvenes, que serán las generaciones encargadas de conducir el destino de nuestro país. Espero que este libro les sea de utilidad para cumplir con esta gran misión que tienen en sus manos y resulte oportuno para ayudar a abrir horizontes y nuevos adeptos a la ciencia.

Dra. Catalina Stern Forgach
Directora General de la Facultad de Ciencias de la UNAM

Presentación serie "Enseñando ciencias"

En las últimas décadas, instituciones educativas de varios países han volteado a ver y a estudiar de manera muy seria el problema de la enseñanza en general y de las ciencias en particular. Lo anterior, en función de la demanda creciente de profesionistas que ha observado este ámbito y que tendrá en los próximos años, pero sobre todo porque la alfabetización científica es ahora, más que nunca, un derecho y una responsabilidad ciudadana en vistas del vertiginoso avance que han conocido las ciencias y la tecnología desde el último cuarto del siglo pasado y que, al día de hoy, tienen una aguda penetración en prácticamente todos los ámbitos de nuestra cotidianeidad.

Este escenario nos lleva a considerar que mejorar el aprendizaje de los alumnos es una prioridad, y que alfabetizar en ciencias no es una tarea fácil: implica formar ciudadanos que conozcan los principales conceptos y teorías de los distintos campos de conocimiento, que sean capaces de usarlos en la resolución de problemas, que conozcan la naturaleza social de la ciencia y sus implicaciones para la sociedad; supone también la formación de capacidades cognitivas, como la interpretación de fenómenos naturales, el procesamiento de información de distintas fuentes y la evaluación de dicha información. El reto para los docentes no es trivial; por ello, fortalecer su formación se convierte en una necesidad inaplazable.

Es, justamente, a partir de este compromiso que la UNAM y Academia Mexicana de las Ciencias (AMC) hemos asumido la tarea de elaborar la serie "Enseñando ciencias", donde se analizan teorías y conceptos centrales de la Biología, las Matemáticas, la Física y la Química, con el propósito de apoyar a los profesores en el fortalecimiento de sus conocimientos disciplinarios, ya que éstos constituyen un elemento central del proceso didáctico. Los nuevos enfoques en el campo de la didáctica de las ciencias señalan que es fundamental que los docentes, además de una sólida formación pedagógica y didáctica, tengan una comprensión profunda sobre la ciencia a enseñar y que conozcan las dificultades en la enseñanza-aprendizaje inherentes a los distintos saberes científicos. Por tanto, deben contar con criterios disciplinarios claros que les permitan determinar los

conceptos, teorías, modelos, entre otros, que son relevantes en la comprensión de las disciplinas científicas en la educación secundaria.

Por lo anterior, me es muy gratificante ver consolidado el esfuerzo de varios colegas en esta serie que se pone al alcance de aquellos que tienen la gran tarea de preparar y formar a nuestros jóvenes en estas áreas de especial relevancia para el contexto actual.

Dr. José Luis Morán
Presidente de la Academia Mexicana de Ciencias

Prólogo

Estimados maestros:

Es un verdadero gusto para mí presentar este libro que forma parte de la serie "Enseñando ciencias", resultado de la labor que desde la Secretaría General de la UNAM y la Academia Mexicana de Ciencias venimos realizando desde hace más de una década en apoyo al fortalecimiento de la Educación Básica, Media Superior y Superior.

En efecto, he tenido el privilegio de coordinar e impulsar, desde el año 2008, diversos proyectos institucionales en apoyo a profesores de todo el país, que se han visto consolidados en cursos, diplomados, estudios diagnósticos y materiales que a lo largo de los años se han ido ajustando y optimizando, con el único fin de coadyuvar al esfuerzo que muchas instituciones y grupos de académicos hemos venido realizando en pro del mejoramiento continuo y permanente de la educación en nuestro país.

A pesar de la trascendencia que tiene la formación científica para los ciudadanos, un buen número de trabajos muestran que los alumnos tienen dificultades para comprender teorías y conceptos científicos. Existe, asimismo, una gran dificultad para que modifiquen sus ideas previas, asimilen nuevas concepciones y para que apliquen los conocimientos adquiridos. A esto se suma la frustración de los profesores debido a los insuficientes resultados en su práctica docente. Son diversos los factores que han originado esta crisis, y entre los más importantes encontramos: la distancia entre las necesidades formativas de los estudiantes y los currículos de ciencia; la gran cantidad de temas que abordan los contenidos escolares y lo poco significativos que resultan para los estudiantes; en muchos casos, una enseñanza de la ciencia basada en visiones deformadas de la actividad científica y en estrategias memorísticas que poco alientan la formación que requiere la sociedad actual; las deficiencias en los enfoques didácticos empleados para abordar las estrategias de razonamiento y solución de los problemas propios de la ciencia.

El trabajo realizado durante estos años parte de la consideración de que la formación científica en campos como Matemáticas, Física, Química y Biología es

fundamental para todos los ciudadanos, ya que cada una de estas disciplinas ofrece distintas maneras de leer, comprender, transformar y preservar el mundo que nos rodea. Los conocimientos que se derivan de estos campos de conocimiento pueden emplearse en la solución de problemas socialmente relevantes y ayudan a tomar decisiones argumentadas y razonadas; fomentan la formación de capacidades cognitivas como la interpretación de fenómenos, el procesamiento y la evaluación de información, la solución de problemas, entre muchos otros aspectos. Por estas razones es tan relevante que los estudiantes de secundaria conozcan teorías y conceptos centrales de estas ciencias y comprendan cómo cada una de ellas explica el mundo que nos rodea. Esto les aportará herramientas para configurar un pensamiento científico que les permita explicar situaciones que los afectan en su vida cotidiana y entender problemas de relevancia científica y social.

En este contexto, el presente libro, producto de la experiencia recabada a lo largo de muchos años de trabajo hombro con hombro con maestros y maestras de todo el país y del conocimiento y compromiso de expertos de la Universidad Nacional Autónoma de México en estos campos del saber, busca ofrecer a los profesores de secundaria un apoyo especialmente pensado para fortalecer sus conocimientos disciplinarios, que acompañados por su experiencia en el aula y su conocimiento pedagógico y didáctico, seguramente aportarán elementos para reforzar su práctica docente, tarea fundamental en estos momentos en que el país requiere de ciudadanos educados y comprometidos con ellos mismos, con la sociedad y con el cuidado de la naturaleza.

Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez
Profesora de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias, UNAM

Introducción al libro *Enseñando Física*

Estimados colegas:

Este libro, que forma parte de la Serie "Enseñando Ciencias", es un texto dirigido y pensado para apoyar en su labor diaria a los profesores de secundaria que imparten la asignatura de física.

El texto está compuesto por cinco grandes apartados escritos por experimentados profesores de física de la UNAM, en sus muy particulares áreas de especialización al interior de la física misma.

El primer bloque, como era de suponerse, empieza con conceptos fundamentales sobre el movimiento y la fuerza, que son parte de la mecánica; es decir, el área más antigua de la física, pero que conoce su punto de inflexión en los siglos XVI y XVII de nuestra era con Galileo Galilei (Italia) e Isaac Newton (Inglaterra). En este bloque se revisan las nociones de "cinemática", "dinámica" y "estática", a través de varios conceptos como velocidad, trayectoria, desplazamiento, distancia recorrida, modelo de ondas, caída libre; así también, del trabajo de Galileo, y de la descripción de las fuerzas en el entorno.

El primer bloque será fundamental para proseguir con el segundo, que trata sobre las leyes del movimiento. Éstas se revisan a través de las tres leyes de Newton (movimiento rectilíneo uniforme; relación fuerza, masa y aceleración, y la acción y la reacción, respectivamente); asimismo, del concepto de gravitación.

El tercer bloque, cuyo título es: "Un modelo para describir la estructura de la materia", es abordado desde un enfoque epistemológico sobre la noción de "modelo" o modelos científicos que diversos pensadores de la antigüedad –como Sócrates, Demócrito, Epicuro, hasta científicos modernos como Newton– desarrollaron mediante teorías, hipótesis o representaciones de la realidad que les permitían comprender los fenómenos del mundo. Con este antecedente se abordan distintos, modelos y teorías sobre la materia, como la densidad de los cuerpos, la presión, el principio de Arquímedes, el concepto de gasto, la ecuación de Bernoulli (el tubo de Venturi), la temperatura y sus escalas de medición, el calor, la conservación de la energía y las leyes de la termodinámica, entre otros modelos. Es de destacar que los conceptos que están detrás de todos estos temas

han encontrado aplicaciones de uso industrial, doméstico o en las grandes obras de ingeniería, gracias a las cuales la humanidad se ha beneficiado y ha sacado provecho de los elementos naturales.

El concepto de materia se presenta en el bloque cuatro, denominado "Manifestaciones de la estructura interna de la materia", donde se explora el modelo atómico, la ley de Coulomb, la corriente y resistencia eléctricas y nociones de electromagnetismo, conceptos de la física, todos ellos, igualmente importantes para el desarrollo de las actividades humanas en tanto aportan conocimiento para la resolución de problemas que nos atañen a todos en lo general o en lo particular, como es el caso de la óptica.

Para terminar, los autores hacen un recorrido por la historia de cómo se han forjado las teorías sobre los factores que dieron origen al universo, como lo fue el llamado *Big Bang* o la Gran Explosión, sus características, la evolución de las estrellas y los instrumentos de que se dispone para estudiar cuerpos que están a años luz de nuestro planeta. Termina el bloque con una reflexión sobre el equilibrio que debe existir entre la ciencia, la tecnología y la sociedad en el aspecto de que el desarrollo científico no debe ponerse por arriba de la preservación de nuestro medio ambiente, de la salud de las personas, animales o plantas. Por el contrario, se trata de seguir incrementando nuestro conocimiento y entendimiento del mundo para buscar las soluciones que requieren los retos actuales como lo son el calentamiento global, el abastecimiento de alimentos y agua a las poblaciones, la lucha contra plagas y otros flagelos que podrían amenazar el equilibrio o la salud de los recursos planetarios.

Es así como estos cinco bloques fueron planeados y desarrollados para entablar un diálogo con los profesores de física de secundaria, quienes encontrarán, sin lugar a dudas, herramientas, estrategias y valiosos consejos para la mejora y profundización de su práctica cotidiana.

Dr. Alfredo Arnaud Bobadilla
Coordinador Académico de la serie "Enseñando ciencias"

1 | La descripción del movimiento y la fuerza

Para describir el movimiento de los cuerpos y la fuerza se recurre a la mecánica. La mecánica estudia el movimiento de los cuerpos, es decir, sus posiciones relativas en el espacio al transcurrir el tiempo y se divide en tres partes: cinemática, dinámica y estática.

El estudio de la mecánica por muchos científicos se remonta a varios siglos, destacan entre ellos dos, por la trascendencia de sus aportaciones: el italiano Galileo Galilei y el inglés Isaac Newton.

Galileo introduce el método experimental en el estudio del movimiento de los cuerpos; asimismo, introduce el lenguaje matemático y muestra que es el apropiado para el trabajo científico. Con estas propuestas estudió el movimiento de caída de los cuerpos y llegó a plantear la posibilidad del movimiento rectilíneo uniforme ante la ausencia de fuerzas sobre un cuerpo inicialmente en movimiento.

Galileo apoyó la propuesta de Nicolás Copérnico de un sistema heliocéntrico para el sistema formado por los pocos planetas conocidos hasta entonces. Como es sabido, el divulgar esas observaciones le costó ser enjuiciado por la Santa Inquisición pero, afortunadamente, no le costó la vida. Fue a partir de Galileo que los científicos de todo el mundo y las personas de los sectores instruidos de las diversas sociedades empezaron a aceptar que la Tierra, nuestro planeta, no es el centro del universo. Esto representó un cambio trascendente en la percepción que del universo tenían las personas y, en particular, un cambio en la percepción de nuestra posición y tamaño en él. Adicionalmente, construyó un telescopio con el que observó manchas en el Sol, cráteres y montañas en la Luna, así como el movimiento de algunos satélites naturales de Júpiter.

Newton, con sus tres leyes sobre el movimiento y su ley de la gravitación universal, explicó el movimiento de los cuerpos, tanto sobre la superficie terrestre, como en el espacio. Sus aportaciones, además de explicar la interacción entre el Sol, planetas, satélites y cometas, han sido la base para el cálculo de la puesta en órbita de diversos satélites artificiales, de telecomunicaciones y meteorológicos y para realizar exitosamente viajes tripulados a la Luna y, recientemente, enviar sondas a Marte.

El movimiento de los objetos

El concepto de movimiento implica el cambio de posición o desplazamiento de un objeto y en él están implícitas las nociones de espacio y tiempo.

Sin duda, el estudio del movimiento ha sido importante en todas las épocas y culturas. El hombre primitivo observó el movimiento de un sinnúmero de animales tan diferentes como el mamut y las aves y diseñó diferentes instrumentos y técnicas específicas para cazarlos.

En algunas culturas, los pájaros eran cazados con cerbatanas. Dado que la presa es muy rápida y pequeña, si el cazador no disparaba con puntería sólo la hería y ésta podía escapar. Entonces idearon ponerle a los dardos veneno de acción rápida, como el curare.

Con el paso del tiempo se fabricaron instrumentos más sofisticados. Así, el éxito en la cacería dependía del movimiento de dos objetos: la presa y el proyectil, así como de la habilidad del cazador.

Otro movimiento que captó la atención de los seres humanos desde la antigüedad fue el de los astros. A éstos se les relacionaba con la divinidad. Dado que el hombre era incapaz de influir sobre su movimiento, sólo se restringió a observarlo y registrarlo. El principal astro de observación fue, desde luego, el Sol, aunque los movimientos de la Luna y Venus también tuvieron un papel importante. A partir del conocimiento adquirido a través de muchos años se descubrieron los periodos, que permitieron plantear las estaciones del año, que fueron de enorme utilidad en el desarrollo de la agricultura.

Una pregunta relevante es ¿cuántos movimientos del Sol se pueden distinguir? Un movimiento obvio es el que empieza con el amanecer y termina en el atardecer, pero en realidad no es el Sol el que se mueve, sino que la Tierra gira sobre su propio eje, produciendo así el día y la noche. El otro movimiento da lugar a las estaciones del año, las cuales son producidas por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

Se llevó mucho tiempo aceptar que eran la Tierra y los demás planetas los que giraban alrededor del Sol. Esta aseveración le costó la vida a Giordano Bruno (1548-1600) y casi sucede lo mismo con Galileo Galilei (1564-1642).

¿Cómo se sabe que algo se mueve?

Si usted viaja en un automóvil y se asoma por la ventana verá que el paisaje va cambiando. Alguien parado junto al camino diría que es el autobús lo que se mueve. Sin embargo, usted podría decir que lo que se mueve es el paisaje (figura 1-1).

Otro ejemplo es la observación de la constelación de Orión durante un par de meses, siempre a la misma hora. Se puede observar que conforme pasa el tiempo la posición en el cielo de esta constelación va cambiando.

En cada caso, se dice que algo se mueve porque se observa un cambio en su posición, percibida como una distancia o un ángulo respecto a un objeto que se toma como referencia, que puede ser cualquier punto fijo: el pico de una montaña, una marca sobre el piso, el horizonte, etcétera.

Se puede apreciar que el café soluble en agua o el petróleo en el mar se mueven azarosamente, impulsados por el movimiento microscópico de las moléculas

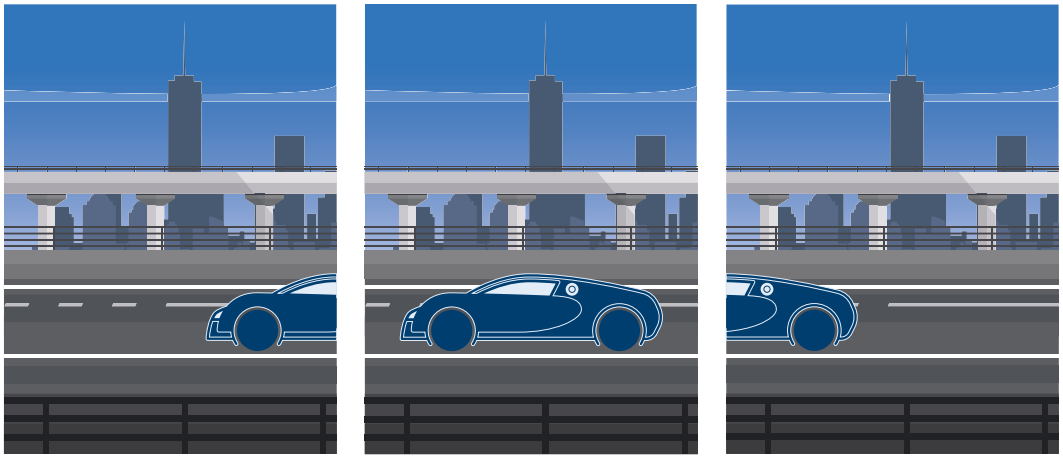


Figura 1-1.
Automóvil en movimiento.

del agua. A este proceso se le llama *difusión* y fue brillantemente explicado por Albert Einstein en 1905, asumiendo que las moléculas del medio golpean a las partículas agregadas, obligándolas a moverse.

El movimiento se puede percibir de diferentes formas, como por ejemplo el ruido del motor de un auto, el golpe de un objeto al caer, el trueno de una descarga eléctrica en la atmósfera, etc. En los fenómenos donde se manifiesta el sonido, debe haber un emisor que lo produce y un receptor que lo capta. Dos ejemplos son: el repique de campanas y el rasgar las cuerdas de una guitarra. Tanto al rasgar la cuerda como al golpear el cuerpo principal de una campana, se genera un movimiento vibratorio que produce el sonido que se percibe. Entonces, puede decirse que cuerpos vibrando producen perturbaciones en el medio que los rodea, el cual en estos casos, es el aire, como se verá más adelante.

En algunos casos se puede seguir el recorrido de cuerpos que se mueven tan rápido como una bala; por ejemplo, los aviones supersónicos pueden volar con esa rapidez y se pueden ver a lo lejos, pero hay que tener presente el tamaño del cuerpo y lo lejos que está del observador (figura 1-2).

En el caso del movimiento rápido de cuerpos cercanos al observador, no es posible distinguirlo a detalle usando nuestros sentidos. Por ejemplo, es imposible seguir el recorrido de una bala disparada por un arma de fuego, o contar el número de aleteos por minuto del vuelo de una abeja o de un colibrí. Lo que se percibe son los sonidos característicos.

Figura1-2.
Avión ultrasónico.

Actividad

Explique por qué el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra se aprecia lento siendo que su velocidad es de 3 680 kilómetros por hora. ¡Casi tres veces la velocidad del sonido!

Hay en la naturaleza movimientos muy lentos, por ejemplo, el avance de un caracol; y otros aún más lentos como el hundimiento, de algunos centímetros al año, de algunos edificios de la Ciudad de México, como la Catedral Metropolitana o el Palacio de Bellas Artes y el de las placas tectónicas, por cuya causa el continente americano se está alejando de las costas de Europa y África, también a razón de unos pocos centímetros por año. Estos movimientos son tan lentos que, por supuesto, no pueden ser percibidos por nuestros sentidos.

Los movimientos muy rápidos y los demasiado lentos también han sido estudiados por el hombre y, para ello, se ha apoyado en algunos dispositivos técnicos que han sido diseñados y desarrollados con base en los avances del conocimiento científico.

Actividad

Investigue y elabore una lista de al menos tres dispositivos técnicos que permitan detectar movimientos que son demasiado lentos o demasiado rápidos para nuestros sentidos.

Quizá sea muy obvia la percepción del transcurso del tiempo a través del paso del día a la noche; de hecho, desde tiempos inmemoriales la humanidad ha sabido que el cambio de longitud de la sombra de un objeto indica la hora del día y que la sombra se acorta hacia el mediodía y se alarga hacia el atardecer. Así, el primer reloj de Sol consistía simplemente en una estaca clavada en el suelo. El más antiguo reloj de Sol conocido, encontrado en Egipto, estaba dividido en 12 partes (figura 1-3).

Pero este reloj tenía un obvio inconveniente, no funciona en días nublados, ni en la noche. Entonces, aparecieron los relojes de agua, que consistían simplemente de un recipiente con un orificio pequeño, por el cual salía el agua. Guillaume Amontons (1663-1705) construyó uno de estos relojes, llamados clepsidras. Otro reloj similar es el de arena, que funciona de forma parecida (figura 1-4).

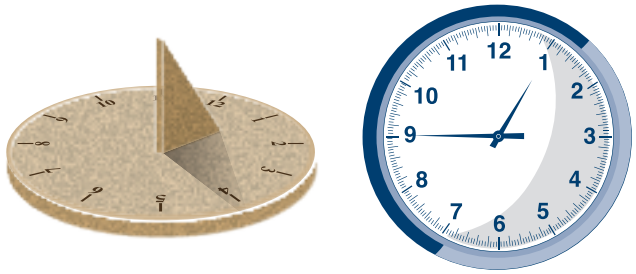


Figura 1-3. Reloj de Sol en comparación con un reloj actual.

Figura 1-4.
Reloj de agua, reloj de arena y reloj de péndulo.

Otra opción que tuvieron los científicos, antes de la aparición de los relojes actuales, fue el contar sus propias pulsaciones mientras ocurría algún evento. También podían medir el tiempo al contar las oscilaciones de un péndulo. Esto dio origen a relojes más modernos en los cuales un péndulo hace girar engranes, que a su vez mueven las manecillas de los relojes llamados "de péndulo".

Actividad. Construir un reloj de agua y uno de péndulo

Para hacer el reloj de agua consiga una botella de plástico de 2 L con tapa, como las de refresco. A ésta córtele la base con unas tijeras, y hágale un hoyo en el tapón más o menos de 4 mm, como se muestra en la figura. Ahora péguele a la botella una cinta adhesiva en la cual dibujará líneas separadas cada centímetro. Llene la botella de agua hasta la primera línea, tapando el hoyo del tapón.

Figura 1-5.
Reloj de agua.

Construya ahora un péndulo; consiga hilo, amarre sus llaves en un extremo y cuélguelo de un soporte. Observe que si lo suelta desde una posición, regresa a ella y continúa oscilando.

Ahora determine el tiempo que tarda el péndulo en realizar diez oscilaciones completas usando el reloj de agua, recuerde que cada oscilación es el tiempo que tarda en ir y regresar a un mismo punto. A este tiempo se le llama periodo. Note que su resultado no estará dado en segundos, sino en sus propias unidades, que puede llamar "líneas de agua". ¿Cuántas "líneas de agua" tarda el péndulo en realizar una sola oscilación? ¿Cómo haría para dar este resultado en segundos?

Ahora aumente el tamaño del hilo y realice nuevamente el experimento. Notará que el periodo depende directamente de la longitud del hilo.

Repita el experimento manteniendo la longitud del hilo constante y cambie la masa que cuelga. Observará que el periodo no depende de la masa ni del ángulo inicial que forma con la vertical.

Con la experiencia que adquirió, ¿cómo determinaría si un movimiento es rápido o lento? ¿Podría medir con los relojes que construyó, por ejemplo, el tiempo de caída de una moneda desde la altura de su cintura? ¿O el movimiento de la sombra de un objeto producida por el Sol?

Marco de referencia y trayectoria; diferencia entre desplazamiento y distancia recorrida

De lo visto hasta aquí, se habrá dado cuenta de que para describir el movimiento, es necesario tener un punto de referencia.

Actividad

Plantee al grupo la siguiente situación: en una competencia de reflejos, están dos campanas separadas 340 metros, la distancia que recorre el sonido en un segundo, en el aire. En medio está un árbitro, con un botón que enciende una luz para indicar a los concursantes que deben golpear su campana con un martillo al momento de recibir la señal luminosa. Los concursantes toman su lugar, el árbitro aprieta el botón y medio segundo después el árbitro escucha simultáneamente ambos golpes y declara un empate. Los participantes reclaman, pues ambos dicen haber escuchado primero su golpe y un segundo después el del otro. Discuta las respuestas:

- ¿Qué golpe fue primero?
- ¿Cómo se resolverían concursos posteriores?

La percepción de los fenómenos depende desde dónde se observan; esto es, depende del punto de referencia. ¿Se aleja o se acerca? ¿Está arriba o abajo? Para responder a estas preguntas se debe indicar respecto a qué, o desde dónde se observa. En cada caso la respuesta puede ser diferente, y aun así correcta. Incluso se puede llegar a calificar la otra observación como falsa, sin serlo, porque simplemente tiene otra referencia.

Sin embargo, hablando de movimiento, el que un cuerpo se mueva quiere decir que pasa de un punto a otro; esto es, que primero ocupaba una posición y luego otra, sin perder de vista que las posiciones y los cambios de posición se describen respecto a un punto de referencia. Así, por ejemplo, para ubicar el domicilio de Pedro, no se puede decir simplemente: "para llegar a la casa de Pedro hay que caminar dos cuadras hacia el norte y una hacia el oeste". Lo correcto sería decir: "para llegar a la casa de Pedro, a partir de la escuela, hay que caminar dos cuadras hacia el norte y una hacia el oeste". En este ejemplo, el punto de referencia es la escuela. En física, al estudiar el movimiento, adicionalmente al punto de referencia, se usa un marco de referencia. Uno de ellos es el ideado por el científico francés René Descartes (1596-1650), que es un esquema geométrico compuesto por dos rectas perpendiculares, sobre las cuales se ubican distancias; el origen es el punto donde se cruzan las dos rectas.

Para describir el movimiento de un cuerpo, se requiere de un *marco de referencia*. En él puede definirse con precisión una *trayectoria* que es la línea que sigue el cuerpo en el espacio durante su recorrido.

Recurriendo a un marco de referencia cartesiano, un punto cualquiera queda determinado por un par de números, a estos números les llamamos *coordenadas*. A la línea horizontal le llamamos *eje x,* y *eje y* a la línea en el plano perpendicular a ella. Con esto, la localización de un punto cualquiera se denota por un par de números dentro de un paréntesis (x, y). De este modo ya se puede determinar la *posición* del objeto en un instante dado; pues para ello simplemente se dan sus coordenadas (x, y).

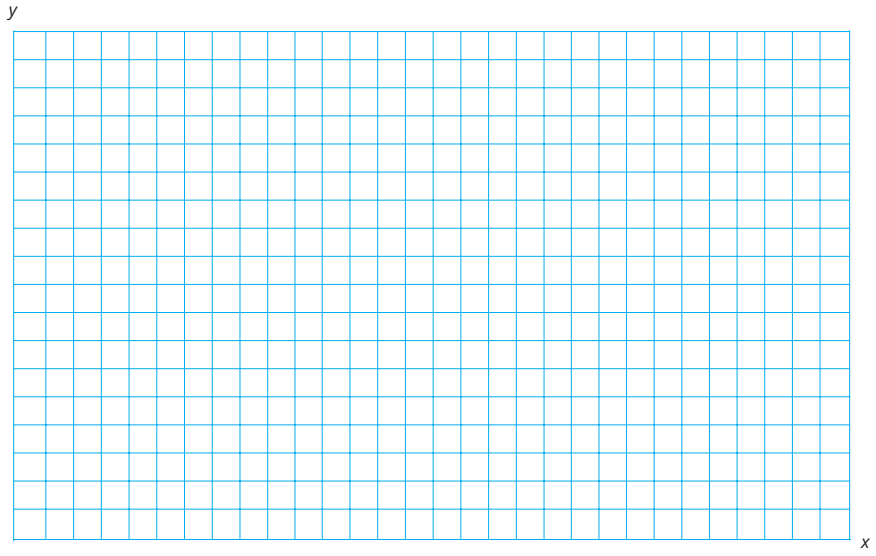


Figura 1-6.
Plano cartesiano.

Actividad

Dibuje una cancha de fútbol con las medidas reglamentarias (90 × 120 m), y sobre ésta los ejes *x* y *y*. Sitúe el origen en la esquina inferior izquierda. Calcule las coordenadas de los manchones de penalti, las esquinas de la cancha (por ejemplo la esquina, que es el origen, es el punto (0, 0)), las esquinas de las áreas chicas y grandes, etcétera.

Sin embargo, si el objeto no se mueve en el plano, sino a una cierta altura, es necesario asignar un tercer número a los dos que ya se tienen. Éste indicará la altura sobre el plano, que se representa por la letra *z*. Es claro que el movimiento del cuerpo ocurre en un espacio de *tres* dimensiones y, por lo tanto, se requieren *tres* números para fijar su posición. El espacio de tres dimensiones es en el que nos movemos y la posición de cualquier objeto se puede escribir según los tres números (*x*, *y*, *z*).

Pero no se sabe qué tan rápido se mueve el objeto; lo que se tiene que hacer ahora es introducir el tiempo en la descripción del movimiento y definir los conceptos de *rapidez* y *sentido*. Para introducir el tiempo en la descripción geométrica del movimiento, es necesario asignar a cada punto un tiempo, que se representa por la letra *t*; ahora los *cuatro* números (*x*, *y*, *z*, *t*) marcan la posición de un evento en un espacio de *cuatro* dimensiones. Este espacio es el *espacio de eventos*.

Lectura. Sistema Internacional de Unidades

Desde las civilizaciones más antiguas, sumerios, egipcios, persas o mayas, el ser humano ha establecido unidades de medida para diversas magnitudes de manejo cotidiano como longitudes, tiempos, pesos, superficies, volúmenes, etc. Esas unidades de medida han sido, por supuesto, muy diversas, variando en cada lugar y época. Con el avance de las comunicaciones entre los diferentes pueblos del mundo, y ante un creciente intercambio de mercancías, de tecnologías y de conocimiento científico, fue necesario acordar un sistema universal de unidades de medida; así, desde el siglo XIX se empezaron a implementar acuerdos respecto al uso de algunas unidades de medida. El actual Sistema Internacional de Unidades (SIU) fue adoptado de forma oficial en 1960, por la Conferencia General de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. En él, se establecen, para longitud, masa y tiempo, el metro (m), el kilogramo (kg) y el segundo (s), respectivamente, entre otras muchas unidades.

Las medidas de tiempo y longitud mencionadas bastan para movernos con soltura en la vida cotidiana, ya sea para llegar a tiempo a una cita, comprar hilo, tela, etc., o describir el movimiento de un cuerpo en el espacio de eventos.

Suponga que un objeto se mueve sobre una línea recta, así, la descripción del movimiento del objeto será en un espacio de dos dimensiones al considerar al tiempo, como se muestra en la figura.

Sobre el eje vertical de la figura se mide la distancia en metros desde el origen ($x = 0$). En el eje horizontal se representa el tiempo (en segundos), que empieza a medirse en el instante $t = 0$.

Un punto P, de coordenadas (t, x), que se denota por $P(t, x)$, representa la posición x del objeto en el tiempo t.

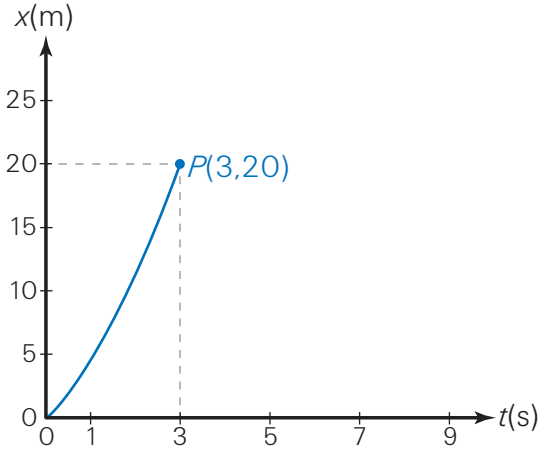


Figura 1-7. Dos ejes perpendiculares que se cruzan en el centro del sistema cartesiano, marcado con $x = 0$ y $t = 0$. Se describe el movimiento del objeto hasta llegar al punto $P(3, 20)$.

Si el objeto está en movimiento, éste se puede representar mediante un conjunto de puntos (t, x) en el espacio de eventos de dos dimensiones.

Actividad

En un lugar con espacio suficiente camine diez pasos hacia el norte, y luego regrese al punto de partida.

¿Cuánta distancia recorrió? ¿Está de acuerdo que han sido veinte pasos en total? ¡A pesar de que el resultado es como si no se hubiera movido de su posición original!

Lo que sucede es lo siguiente: su desplazamiento total ha sido la suma de dos desplazamientos, de igual tamaño y dirección, pero en sentido contrario. El primer desplazamiento fue en sentido hacia el norte, con un tamaño de diez pasos. El segundo desplazamiento fue también de magnitud de diez pasos, pero en sentido contrario, hacia el sur. La suma dio cero, como en la figura.

Si hubiese caminado siempre hacia el norte, mediante dos desplazamientos de diez pasos cada uno, ¿dónde estaría?

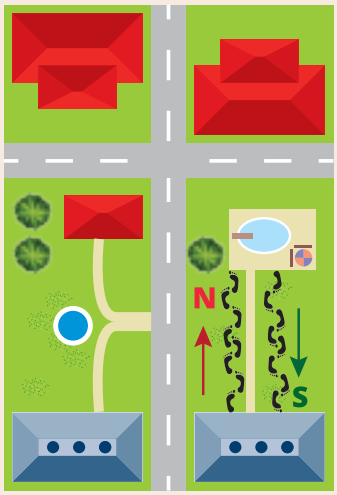


Figura 1-8. Suma nula de dos desplazamientos colineales de igual tamaño, hacia el norte y hacia el sur.

Velocidad: desplazamiento, dirección y tiempo

El *desplazamiento* de un objeto desde su posición inicial x_i hasta la posición final x_f se denota por $\Delta x = x_f - x_i$ (esta ecuación se lee "*Delta equis es igual a equis f menos*

equis i", donde Δ es la cuarta letra mayúscula del alfabeto griego, y generalmente se usa para denotar el cambio en una variable, en este caso, la posición).

Es importante notar que el desplazamiento tiene dos características: su tamaño o magnitud (que en este caso es la cantidad sin tomar en cuenta su signo, es decir, su valor absoluto, que se escribe $x_f - x_i$); y su orientación, que para el caso unidimensional es positiva si $x_f > x_i$, lo que quiere decir que la posición final es mayor que la posición inicial, y negativa si $x_i > x_f$. Así que calificamos al desplazamiento como un vector.

Figura 1-9. Vector.

Geométricamente, un vector se puede representar mediante una flecha. Al escribir una cantidad vectorial, se le agrega una flecha arriba de las letras que la representan, por esto, el desplazamiento se escribe como $\vec{\Delta x}$. En el caso del vector desplazamiento, el origen de la flecha se ubica en la posición inicial x_i y su punta en la posición final x_f.

¿Qué son la rapidez y velocidad de un objeto?

Cuando se dice que un automóvil viaja a *"ciento veinte kilómetros por hora"*, se habla de una *cantidad escalar*, que en este caso es la *rapidez*. Para expresar una cantidad escalar, basta con dar su tamaño y las unidades en que se mide, por ejemplo, 25 °C, 45 s, 30 m, 3 kg, etcétera

Ahora bien, para expresar la velocidad de un objeto, además de dar la rapidez (su tamaño y unidades), es necesario especificar su orientación, es decir, hacia dónde se dirige, por ejemplo 120 km/h hacia el sur. Como se mencionó anteriormente, a las cantidades que tienen magnitud y orientación se les llama *cantidades vectoriales*. La velocidad es una cantidad vectorial que se denota por $\vec{v}$, así como el desplazamiento y la fuerza, entre otras.

Para calcular la rapidez con la que se mueve un objeto, se toma el cociente de la magnitud del desplazamiento $|\Delta x| = |x_f - x_i|$, entre el lapso de tiempo $\Delta t = t_f - t_i$:

$$v = \left|\frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}\right| = \left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right|$$

en donde v (sin flecha) denota la rapidez, o magnitud de la velocidad.

Suponga que quiere calcular el tiempo que tarda un balón que viaja a una rapidez de 120 km/h al recorrer una distancia de 52.5 m. Note ahora que, con el valor de la rapidez y el de la distancia, se puede predecir el lapso de tiempo que tarda el balón en recorrer dicha distancia.

De la fórmula anterior se despeja el lapso de tiempo Δt, como:

$$\Delta t = \left|\frac{\Delta x}{v}\right| = \frac{52.5 \text{ metros}}{120 \dfrac{\text{kilómetros}}{\text{hora}}} = \frac{52.5 \text{ metros}}{\dfrac{120 \times 1000 \text{ metros}}{3600 \text{ segundos}}} = \frac{52.5 \text{ metros}}{33.3 \dfrac{\text{metros}}{\text{segundo}}} = 1.6 \text{ segundos}$$

Es decir, tarda un segundo y seis décimas.

En este ejemplo, se ha comprobado que el movimiento de un objeto es *relativo* al marco de referencia; el balón se mueve respecto a un punto fijo (el origen). Pero si se ve en una televisión cuya imagen es captada por una cámara que se mueve siguiendo al balón, éste se ve fijo respecto a la pantalla. En este caso son los alrededores los que se mueven con la misma rapidez, pero en sentido contrario.

Lectura. La latitud y la longitud terrestres

Describir el movimiento de un balón de fútbol es un ejercicio divertido, pero no tiene la trascendencia que tuvo el determinar la posición exacta de los barcos en alta mar. Resolver este problema fue básico para la seguridad de las naves, pues de ello dependía que el comercio pudiera llevarse a cabo.

La prosperidad de muchas naciones, en particular la inglesa en el siglo XVII (donde y cuando vivió Isaac Newton), demandaba la solución del problema.

La posición de un punto sobre la superficie de la Tierra, que ahora será nuestro nuevo marco de referencia, queda determinada por dos números: latitud y longitud. La latitud es el ángulo λ (lambda) que forman la línea que va del centro de la Tierra al lugar y la línea que va del centro de la Tierra a un punto en el ecuador, de modo que ambas líneas estén contenidas en el plano meridiano del lugar.

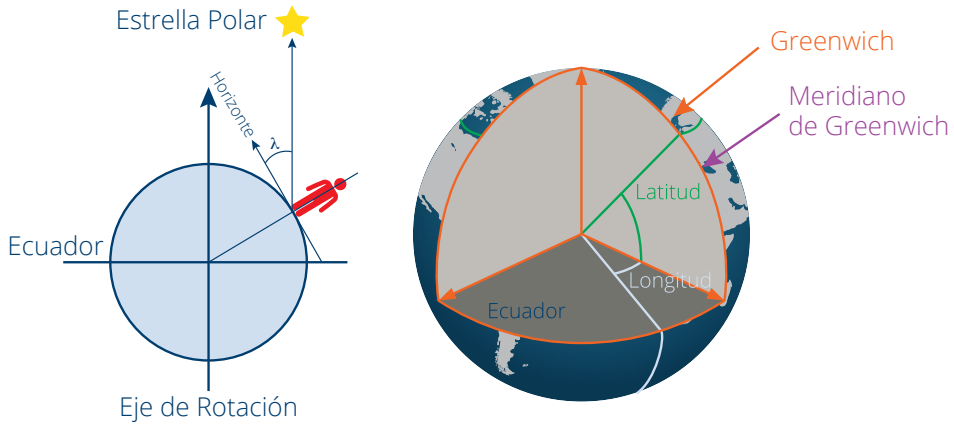


Figura 1-10. Latitud y longitud de un punto sobre la superficie de la Tierra.

En la figura se aprecia que λ es también el ángulo que forma la línea que va del observador a la Estrella Polar (cuya posición no cambia en el cielo) con

la línea horizontal del lugar, ambas líneas contenidas también en el plano meridiano del lugar. Debido a esto, un buen marinero podía saber su latitud midiendo este ángulo por la noche.

El problema radicaba en la medición de la longitud, que es el ángulo que forman el plano meridiano del lugar y otro plano meridiano que pasa por algún sitio considerado como origen, el cual, por convención internacional, se considera el observatorio astronómico de la ciudad inglesa de Greenwich.

Para determinar la longitud de un punto sobre la superficie de la Tierra. Por ejemplo, un lugar en el mar donde se encontraba un barco, se ideó otro procedimiento: la medición del tiempo mediante relojes muy precisos, para comparar la hora entre Greenwich y la hora del lugar cuya longitud se quiere conocer, es decir, la del barco.

Por lo anterior, los tripulantes en el barco deberían llevar un reloj que marcara la hora del meridiano de Greenwich. Este reloj se pondría a tiempo en dicha ciudad, de modo que marcara las 12 del mediodía en el preciso momento en que el Sol llegara a su altura máxima.

Después, en el barco, se debería determinar el momento en que el Sol llegara a su altura máxima, que son las 12 del mediodía en ese lugar. Si en ese instante el reloj que está a la hora de Greenwich marcara, por ejemplo, las 3 de la tarde, entonces la longitud del lugar se puede calcular como:

$$\frac{3 \text{ horas} \times 360 \text{ grados}}{24 \text{ horas}} = 45 \text{ grados al oeste de Greenwich}$$

Hubo otros intentos para la medición del tiempo, además de los relojes mecánicos y el reloj astronómico solar. Estos incluyeron la observación del movimiento regular de la Luna y el de las lunas de Júpiter.

Con esta motivación, hubo científicos que destacaron estudiando y diseñando dispositivos o métodos para medir el tiempo. Así, por ejemplo, Galileo Galilei observó y midió el periodo de traslación de las lunas de Júpiter, Christian Huygens (1629-1695) estudió las bases científicas del péndulo, contribuyendo así en la construcción de relojes mecánicos.

Actividad

Calcule la longitud de su localidad a partir de su diferencia horaria con respecto al GMT (Tiempo del Meridiano de Greenwich por sus siglas en inglés.)

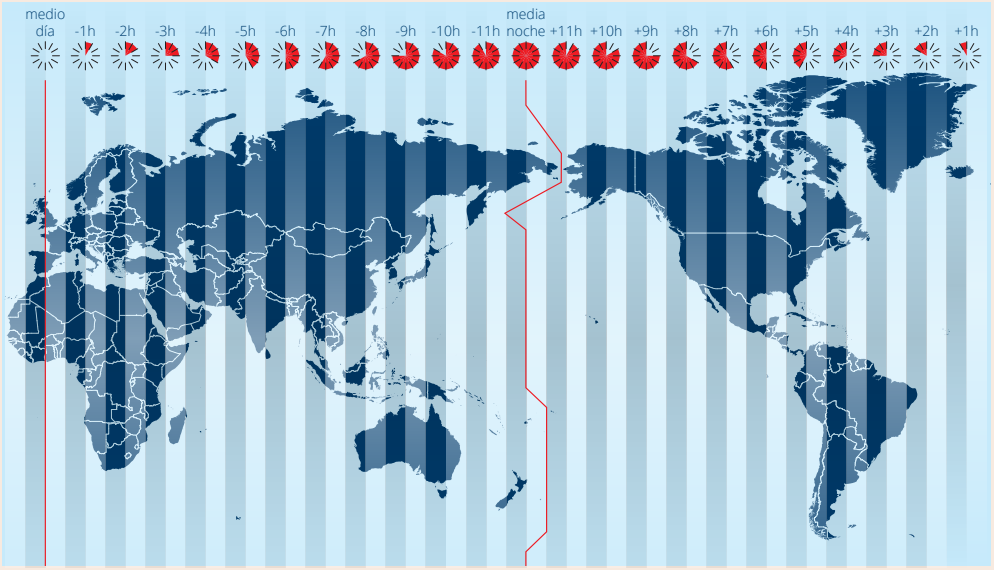


Figura 1-11. Mapa con husos horarios.

Interpretación y representación de gráficas posición-tiempo

Si un objeto se mueve a lo largo de una línea recta sobre la cual se mide la distancia que recorre a partir de un punto de referencia "0", la coordenada *x* representa la distancia recorrida por el objeto.

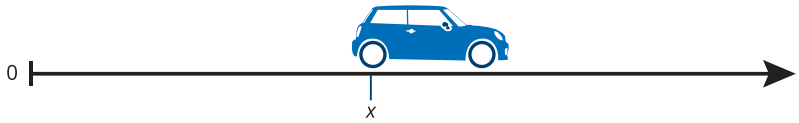


Figura 1-12. El objeto sobre la línea recta. Se señalan los puntos 0 y *x*.

La tabla de la derecha indica los valores de distancia (*x*) y tiempo (*t*) para este movimiento.

Entre paréntesis están las unidades en que se miden el tiempo y la distancia.

Esta tabla de datos da idea sobre el movimiento del objeto, pero es más sencillo analizarlo si con ellos se elabora una gráfica *"distancia en función del tiempo"*.

Primero se dibuja el plano cartesiano con sus ejes perpendiculares. En el eje horizontal se representa al tiempo, en el vertical a la distancia y se gradúan los ejes. En el eje horizontal, los valores de tiempo van de 0

t(s)	*x*(m)
0	10
5	60
10	110
15	160
20	210
25	210
30	210

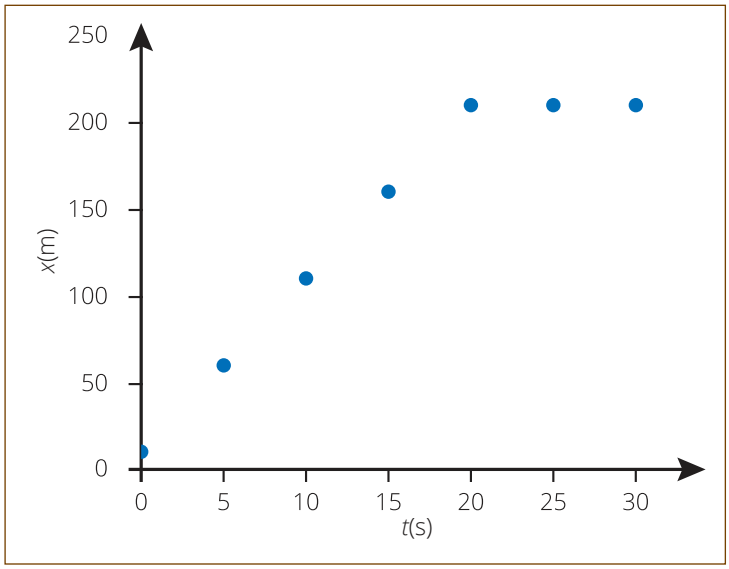


Figura 1-13.
Gráfica "*x* en función de *t*", ejes con graduaciones.

a 30 s; mientras que en el eje vertical, los valores de distancia van de 10 a 210 m. En este ejemplo se usan intervalos de 5 s para el eje horizontal, e intervalos de 50 m para el eje vertical (figura 1-13).

Ahora se ubican los datos de la tabla en la gráfica. Finalmente, dado que se trata de un movimiento rectilíneo uniforme, al dibujar una línea sobre esos puntos, la gráfica *"x en función de t"* queda como se muestra en la figura 1-14.

Esta gráfica da información de cómo va cambiando la posición del objeto al transcurrir el tiempo.

Se puede conocer la posición del objeto en el instante que se quiera en el intervalo de tiempo estudiado. Para ello, primero localice el valor del tiempo que quiera sobre el eje horizontal de la gráfica, trace una línea vertical a partir de ese punto, hasta que intersecte la línea de la gráfica; en ese punto trace ahora una recta horizontal que intersecte al eje vertical. Este punto es la posición *x* del objeto en el tiempo elegido *t*. Por ejemplo, para $t = 9$ s, el objeto se encuentra a una distancia de 100 m del punto de referencia (figura 1-15).

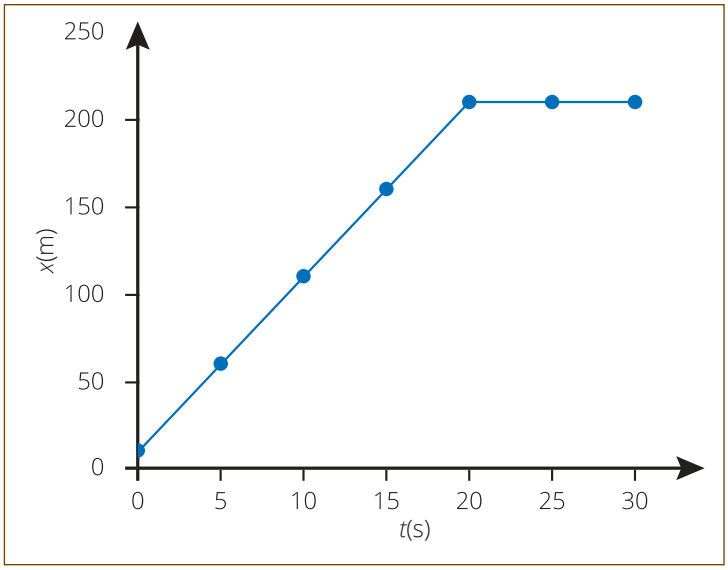


Figura 1-14.
Gráfica "*x* en función de *t*".

Otra información que se obtiene de la gráfica es la posición inicial del objeto, esto es, para $t = 0$ s, la coordenada *x* tiene un valor de 10 m; lo que indica que inicialmente el objeto se encontraba a una distancia de 10 m del punto de referencia 0.

Se obtiene además, que entre $t = 0$ s y $t = 20$ s la línea es una recta con cierta pendiente (o inclinación), y de $t = 20$ *s* en adelante, la línea en la gráfica se hace horizontal; es decir, la distancia se mantiene constante en el valor $x = 210$ m, aunque sigue transcurriendo el tiempo. Así que la gráfica describe dos tipos de comportamiento.

Considere ahora un intervalo de tiempo cualquiera, por ejemplo el intervalo entre $t_1 = 5$ s y $t_2 = 15$ s. La duración de este intervalo esta dada por la diferencia $\Delta t = t_2 - t_1$, que en este caso es de 10 s (figura 1-16).

Ahora, la coordenada *x* en el instante t_1 vale $x_1 = 60$ m, y en el instante t_2 vale $x_2 = 160$ m. Así que $\Delta x = x_2 - x_1 = 100$ m.

Al calcular el cociente entre la distancia recorrida y el intervalo de tiempo empleado, se obtiene la rapidez:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{100\ \text{m}}{10\ \text{s}} = 10\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

y ese mismo valor de rapidez se encontrará para el ejemplo dado, si se considera cualquier otro Δt en los primeros 20 segundos, esto es, el objeto se desplaza con una rapidez constante de 10 m/s en los primeros 20 segundos de movimiento.

Observe que para un intervalo Δt fijo, la rapidez varía de manera directamente proporcional con la distancia recorrida Δx. Si, por ejemplo, el objeto llevara el doble de rapidez, recorrería el doble de distancia en el mismo intervalo Δt.

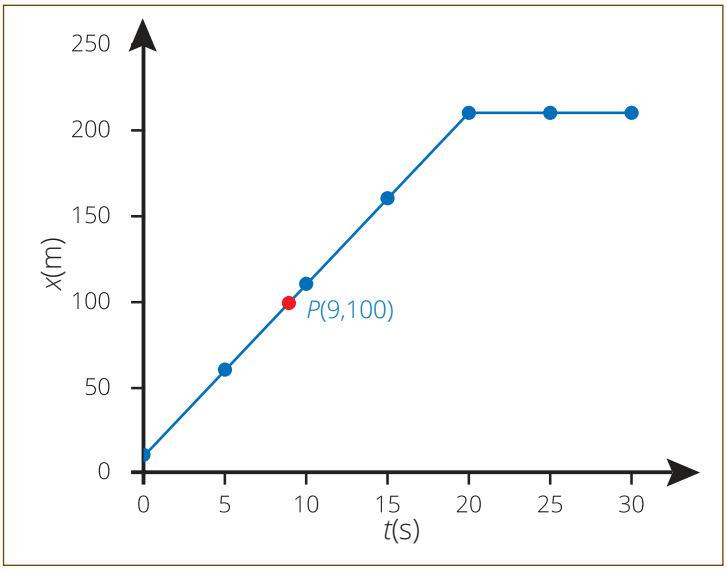


Figura 1-15. Gráfica "*x* en función de *t*" indicando el punto (9,100).

Si ahora se fija la distancia recorrida Δx, entonces la rapidez varía de manera inversamente proporcional con el intervalo Δt. Así, si el objeto llevara el doble de la rapidez, recorrería la misma distancia Δx en la mitad del intervalo Δt.

En la gráfica, entre 0 s y 20 s se obtiene una recta inclinada; y de 20 s en adelante otra recta, pero horizontal, como ya se dijo. En la primera recta se puede seleccionar cualquier intervalo de tiempo Δt, determinar su correspondiente intervalo de distancia Δx, y calcular el cociente $\Delta x/\Delta t$; verá que obtiene el mismo cociente, 10 m/s. Esto indica que el objeto se movió con la misma rapidez en todo el intervalo de 0 a 20 s.

Ahora bien, de t = 20 s en adelante, se tiene una recta horizontal; sin importar el intervalo de tiempo que se seleccione, su correspondiente Δx valdrá siempre cero, pues x_1 y x_2 valen lo mismo. De manera que en este caso, la rapidez vale 0 m/s en todo ese intervalo de tiempo.

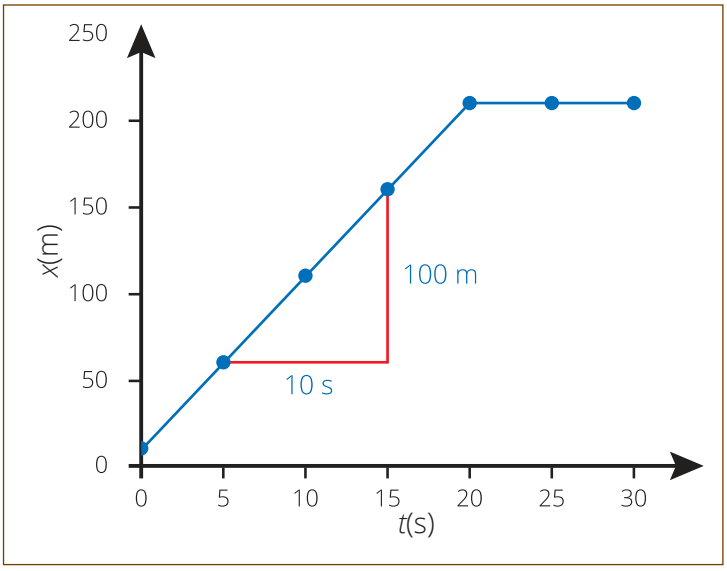


Figura 1-16. La diferencia de altura representa la distancia recorrida por el carrito en el intervalo de tiempo considerado.

Es el momento de destacar algo relevante. Si se calcula $\Delta x/\Delta t$ para cualquier intervalo de tiempo y se obtiene el mismo cociente, esto indica que el objeto se movió con la misma rapidez en todo el tiempo bajo estudio; a este tipo de movimiento se le llama *movimiento rectilíneo uniforme*. Ahora bien, si para cualquier intervalo de tiempo que se seleccione, su desplazamiento Δx vale siempre cero, pues x_i y x_f valen lo mismo, la rapidez vale cero en todo ese tiempo bajo estudio. A este estado de movimiento se le llama *reposo*.

En la gráfica de distancia contra el tiempo, la rapidez es la inclinación o pendiente de la recta *"x en función de t"*. A mayor inclinación, mayor rapidez.

Actividad

Considere el movimiento representado en la figura 1-17.

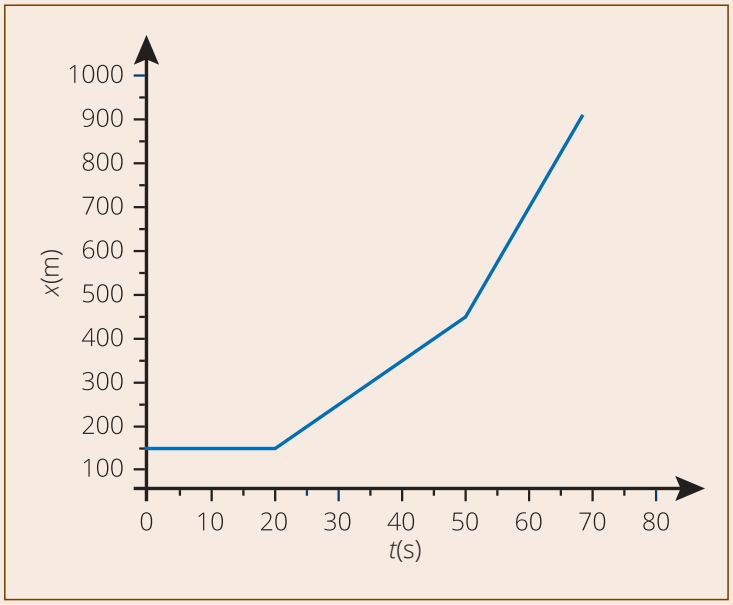


Figura 1-17.
Gráfica "*x* en función de *t*", 3 velocidades.

Se distinguen tres intervalos de tiempo.

- De t_0 = 0 s a t_1 = 20 s
- De t_1 = 20 s a t_2 = 50 s
- De t_2 = 50 s a t_3 = 70 s

1. Para cada intervalo de tiempo escriba:
   a) su duración
   b) su distancia recorrida
   c) su rapidez
2. ¿Las pendientes o inclinaciones de los segmentos rectilíneos son iguales o diferentes?
3. ¿Los valores de la rapidez para los tres intervalos de tiempo son iguales o diferentes?
4. Calcule los valores para la rapidez en cada uno de los tres intervalos de tiempo en orden decreciente de inclinación de los segmentos de recta correspondientes.

Las respuestas correctas a las preguntas 2, 3 y 4 permiten concluir que en una gráfica *"x en función de t"* si la velocidad del cuerpo es constante, la línea obtenida es una recta; y la pendiente de esa recta está directamente relacionada con la magnitud de la velocidad.

Actividad

Observe ahora la siguiente gráfica mostrada en la figura 1-18. La línea roja corresponde al movimiento de Juan, y la verde, al de Pedro.

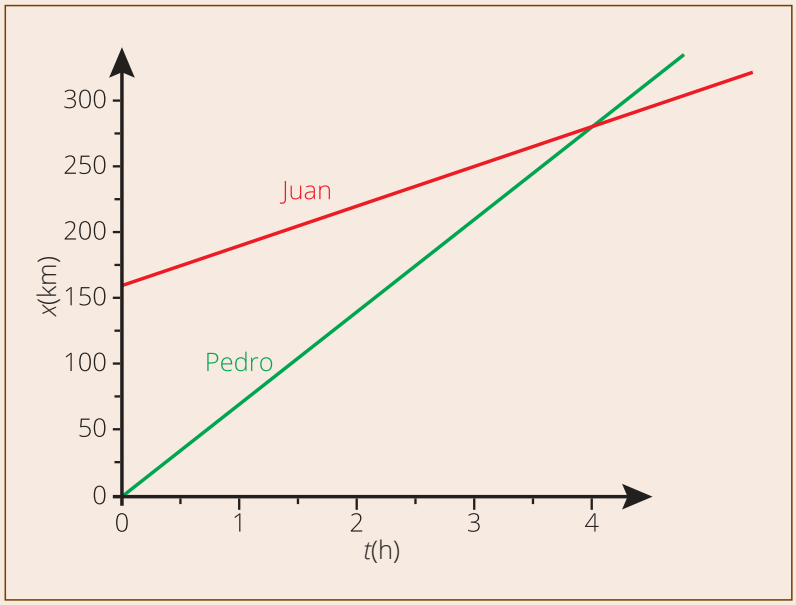


Figura 1-18.
Gráfica Juan y Pedro.

- ¿Quién va más rápido?
- ¿Partieron al mismo tiempo?
- ¿Partieron del mismo punto?
- ¿Qué significa el cruce de las líneas? ¿En qué tiempo, y en qué punto, alcanza uno al otro?

Actividad

Se estudiará la relación entre la distancia recorrida y el tiempo transcurrido para un objeto que desciende con velocidad constante.

Material necesario:

- Un filtro de papel para café.
- Un cronómetro.
- Una cinta métrica.
- Cinta adhesiva.

En una pared pegue verticalmente 1.5 m de cinta adhesiva.

Luego dibuje sobre la cinta cinco rayas horizontales separadas treinta centímetros cada una. Procure que la primera marca esté a 30 cm del

extremo superior de la cinta. Asigne a cada marca la distancia vertical *x* empezando, de arriba hacia abajo, con el 0.0 m en la primer marca, el 0.30 m en la segunda, 0.60 m en la tercera, etc., hasta llegar a 1.5 m en la última.

Tome el filtro para café con ambas manos; elévelo unos 30 cm por arriba de la primera marca y suéltelo.

Suelte el filtro desde el mismo punto varias veces y pídale a un compañero que, con el cronómetro, mida el tiempo que tarda el filtro en descender para cada una de las distancias señaladas en la cinta adhesiva. Se harán tres mediciones de tiempo para cada una de las distancias de descenso y se obtendrá el promedio de esos valores, redondeando a un decimal.

El compañero que mide el tiempo empezará a contar el tiempo cuando el filtro pase por la marca de 0.0 m, y detendrá el cronómetro cuando el filtro pase por la marca correspondiente a la distancia con la que se esté trabajando. Así, por ejemplo, al empezar con la distancia mayor, el que mide el tiempo pondrá en marcha su cronómetro cuando el filtro pase por la marca de 0.0 m, y lo detendrá cuando el filtro pase por la marca de 1.5 m. Eso se hará tres veces, anotando los tres valores obtenidos en una tabla. Luego se repite la operación para las otras distancias de descenso. El tiempo promedio t_{prom} se obtiene al sumar los tres valores de *t* y dividirlo por 3.

x(m)	t_1(s)	t_2(s)	t_3(s)	t_{prom}(s)
0.0				
0.3				
0.6				
0.9				
1.2				
1.5				

Haga la gráfica de "distancia en función del tiempo" para este movimiento usando los valores de t_{prom}.

Conteste las preguntas siguientes:

5. ¿Qué información da la gráfica *"x en función de t"* sobre el movimiento de descenso del filtro de café?
6. ¿Cuál es la rapidez en cm/s?

La figura 1-19 corresponde al movimiento de un objeto que parte en el tiempo t_1 = 0 s de la posición x_1, avanza con rapidez v_1 hacia a la posición x_2 a donde llega

en el tiempo t_2. En seguida regresa con una rapidez v_2 a la posición original, arribando al tiempo t_3. Note que $v_2 = v_1$ y que la velocidad $\vec{v}_1$ apunta en dirección opuesta a $\vec{v}_2$.

La figura 1-20 representa el movimiento compuesto de trayectorias sucesivas en que un objeto primero se aleja del origen y en seguida se acerca, con igual rapidez en cada tramo. Se trata de un *movimiento oscilatorio*.

En este caso, al tiempo que transcurre entre las dos primeras posiciones idénticas se le llama *periodo*, y se representa por la letra *T*.

Otro movimiento importante de estudio es el movimiento periódico, como el de un péndulo, en donde ahora se medirá el ángulo θ que forma el hilo con la vertical (figura 1-21).

El movimiento en el espacio (*i*, *t*) es también como una sierra, excepto que ahora las líneas están redondeadas. Esto se debe a que la rapidez no es constante. Se puede observar que hay un instante, en la cresta de la gráfica, en que el movimiento cambia de dirección. En ese punto, la rapidez es cero; luego ésta empieza a crecer hasta llegar a un valor máximo al pasar por el punto de equilibrio, y de aquí continúa decreciendo hasta hacerse nuevamente cero en el punto de retorno.

La frecuencia que se escribe como *f*, es la cantidad de oscilaciones que ocurren en un segundo.

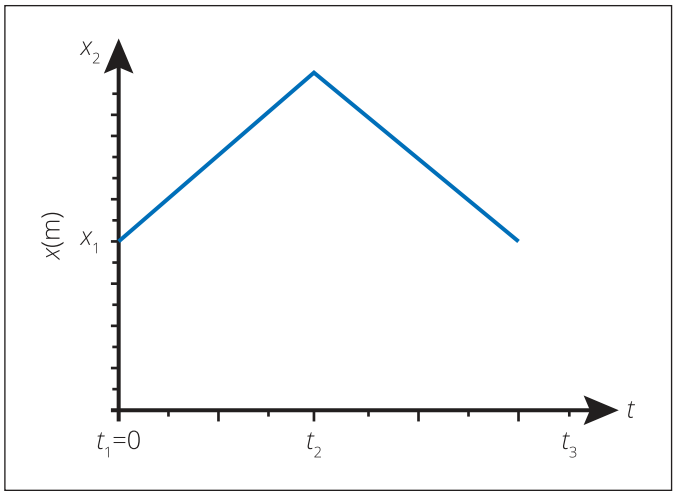


Figura 1-19. "V" invertida.

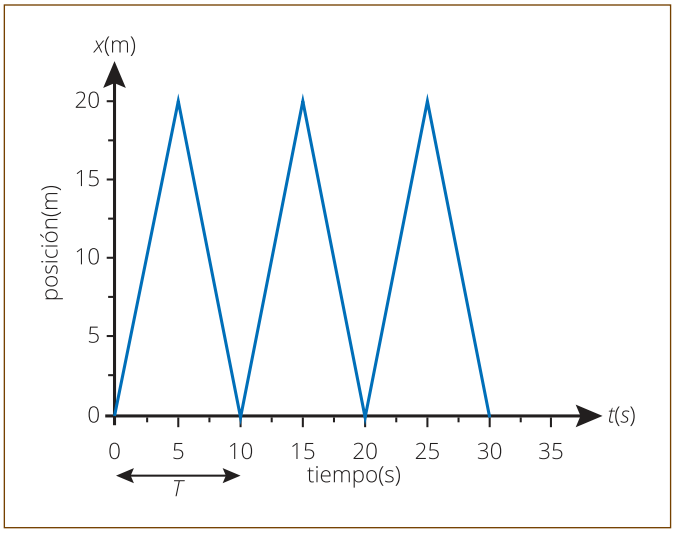


Figura 1-20. Gráfica de V invertidas.

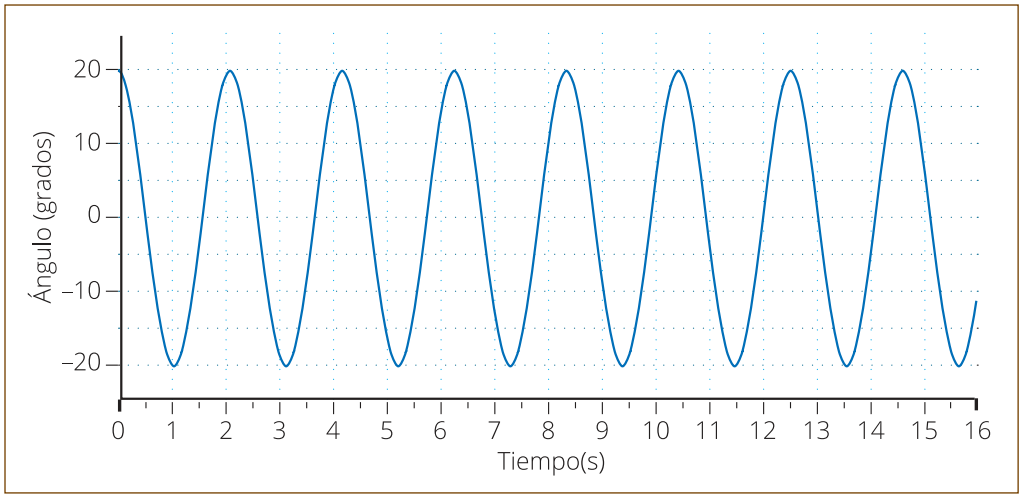


Figura 1-21. Péndulo (*i*, *t*).

Movimiento ondulatorio, modelo de ondas y explicación de características del sonido

Una onda es un movimiento oscilatorio que se propaga en un *medio*. En las *ondas transversales*, como las que se producen en un estanque donde se ha lanzado una piedra, el movimiento oscilatorio del agua es perpendicular a la dirección en que la onda se desplaza (figura 1-22). Esto mismo sucede en una onda transversal producida en un "resorte de gusano".

Figura 1-22. Ondas en un estanque.

En las *ondas longitudinales*, que también pueden transmitirse en un "resorte de gusano", el movimiento de un paquete de espiras es hacia adelante y hacia atrás, en la misma dirección en que longitudinalmente ocurre la propagación de la onda (figura 1-23).

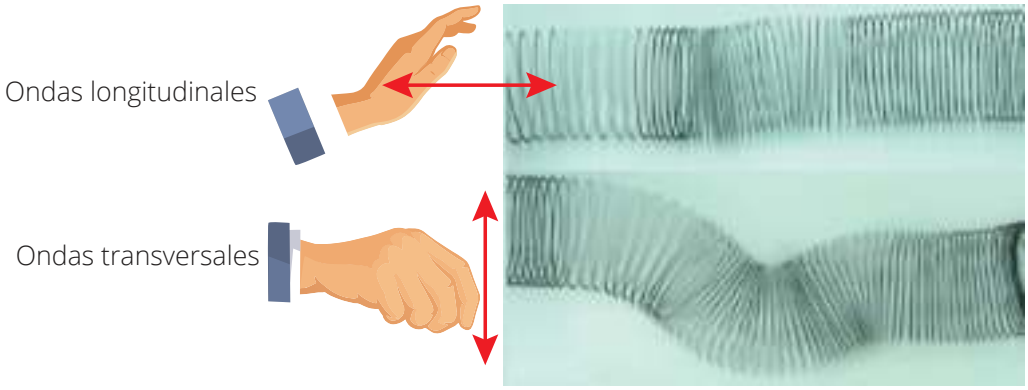


Figura 1-23. Ondas longitudinales y transversales.

En ambos casos, ondas transversales y longitudinales, las partículas del medio (las del agua o las del resorte), que oscilando producen la onda, no se trasladan con ella. Lo que la onda transporta es una *señal*, que es precisamente el movimiento oscilatorio local del medio.

La ola en un estadio de fútbol permite verlo con más sencillez y claridad. A una señal, un grupo de aficionados cercanos entre ellos, situados sobre una hilera de asientos, se para del asiento levantando al mismo tiempo los brazos y, en seguida, se sientan bajándolos. Es un movimiento oscilatorio arriba-abajo. Los vecinos de uno de los lados, por ejemplo, del derecho, inician con un ligero retraso su propio movimiento arriba-abajo consiguiendo, con esto, estar completamente de pie una fracción de segundo después de que el vecino lo hizo. Y así para cada hilera. Lo que se ve en el estadio es la propagación de la señal inicial: se ha producido *la ola*.

Observe que la señal o perturbación que se propaga, en el caso de *la ola*, es el movimiento oscilatorio arriba-abajo de las personas, pero ellas mismas no avanzan con la onda, se quedan en su lugar. En conclusión, se puede decir que una onda es la propagación de una perturbación sin transporte de materia.

Ahora bien, la importancia del movimiento ondulatorio en la tecnología radica precisamente en que es capaz de transmitir una señal que a su vez produce un efecto físico en algún objeto receptor.

Es el caso del oído, al captar las compresiones del aire, producidas por las ondas, hace que se perciban como *sonido*. El sonido conduce señales que llevan *información*, como las palabras del lenguaje o la música.

¿Cómo se perciben las vibraciones generadas como sonido?

La vibración perturba al medio que rodea a la fuente vibratoria; este medio puede ser, además de un gas como el aire, un líquido o un sólido. La perturbación se propaga en el medio y llega a los oídos, se transmite al tímpano, lo hace vibrar, y el cerebro lo interpreta como sonido.

En la figura 1-24 se muestra un esquema del oído; en él se identifican las tres partes que lo constituyen.

- *Oído externo.* Lo conforman la oreja y el conducto auditivo externo.
- *Oído medio*. Constituido por el tímpano y la cadena de huesecillos denominados martillo, yunque y estribo.
- *Oído interno*. Formado por el caracol enrollado en espiral y lleno de líquido; en su interior se encuentran las células ciliadas que, al ser estimuladas por las vibraciones sonoras, envían información al cerebro.

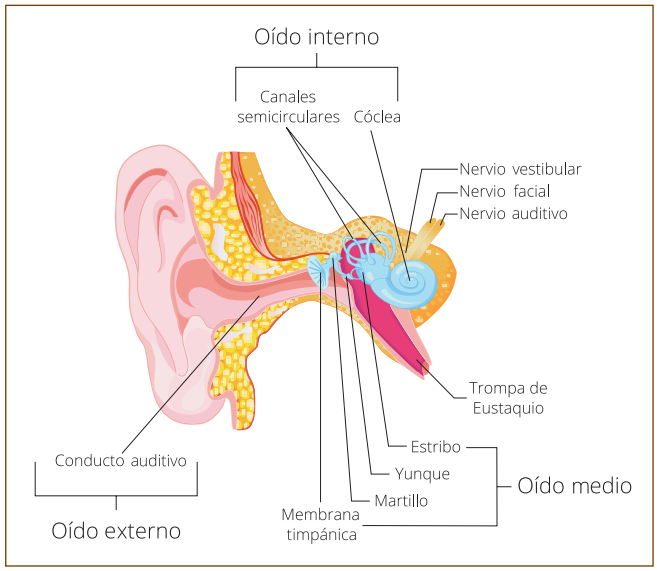


Figura 1-24. Esquema del sentido del oído.

Las ondas sonoras penetran por el conducto auditivo y llegan al tímpano. Éste amplifica la vibración en la cadena de huesecillos, haciendo que se muevan. Este movimiento oscilatorio transmite la vibración al caracol. Las células ciliadas que cubren el interior del caracol envían información al cerebro y con ello se

escuchan los sonidos. La intensidad de los sonidos depende del número de células que se estimulen.

Mientras mayor sea la potencia de la fuente sonora, mayor será la intensidad del sonido emitido, lo que produce mayores vibraciones en el tímpano, así que sonidos muy intensos, pueden llegar a producir dolor.

El nivel de sensación sonora se mide en decibeles (dB). Ésta es una escala logarítmica (al igual que la escala Richter para los sismos): si la intensidad de un sonido se duplica, el número de decibeles aumenta en tres.

Nivel de sensación sonora (dB)	Sonido
0	No se aprecia
10	Movimiento de hojas
30	Tictac del reloj
42	Calle tranquila
60	Conversación normal
78	Oficina ruidosa
99	Batidora
115	Concierto de rock
130	Avión despegando
136	Sonidos intensos que provocan dolor

Cabe hacer notar que el umbral de detección, esto es, el valor de intensidad mínimo que se puede oír, varía de persona a persona, e incluso, para una misma persona varía con la edad. En ausencia de un medio trasmisor, el sonido no se podría producir. El físico y químico inglés Robert Boyle (1627-1691) diseñó un experimento con una bomba de vacío, la que no difiere mucho de una aspiradora casera. Se coloca una fuente de sonido dentro de un frasco transparente cerrado herméticamente. Se le extrae el aire mientras la fuente de sonido continúa trabajando. El sonido disminuye conforme se extrae el aire, y aumenta al entrar el aire al frasco nuevamente.

Otros movimientos que se sienten e impactan son los de suelo, que pueden ser de origen local, como cuando un cuerpo pesado golpea contra el piso, o un tráiler pasa cerca. Más importantes para nuestras ciudades son los terremotos que han causado tanta devastación. Éstos son ondas mecánicas, las cuales se presentan cuando se acumula una gran cantidad de energía en la corteza terrestre al comprimirse las placas tectónicas una contra otra (falla geológica), haciendo que la tensión aumente, y que, al reacomodarse estas placas, se libere una enorme cantidad de energía, generando ondas de gran amplitud que viajan alejándose radialmente del punto en que se generaron (conocido como foco). El punto sobre la superficie de la tierra justo arriba del foco, se denomina epicentro. La

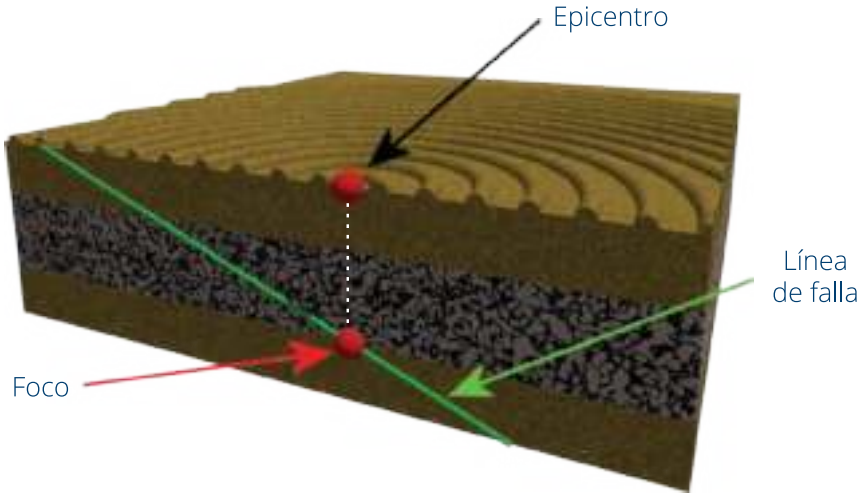


Figura 1-25.
Esquema ondulatorio de un terremoto.

mayoría de los sismos que ocurren en México tienen su epicentro en las costas de Oaxaca y Guerrero. Así que tardan en llegar a la capital del país varias decenas de segundos; de manera que si al momento de ocurrir un sismo, se envía una señal con ondas de radio hacia la capital, los ciudadanos de ésta cuentan con algunos segundos para ponerse a salvo, ya que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz, mientras que las del sismo viajan a velocidades mucho menores.

Si el epicentro del terremoto está en el mar, la onda que se forma desplazará una gran cantidad de agua, formando una enorme ola de más de 10 metros de altura y varios kilómetros de largo que puede arrasar ciudades costeras, como lo hizo el tsunami de 2004 originado en Sumatra. El saldo fue casi 300 mil víctimas en Indonesia, Tailandia, Bangladesh, India, Sri Lanka, las Maldivas e incluso Somalia, al este de África.

Otro gran terremoto en Japón oriental fue de magnitud 9 en la escala de Richter, y creó olas de hasta 40.5 metros. El terremoto ocurrió el 11 de marzo de 2011, el epicentro se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai. Éste ha sido el terremoto más potente sufrido en Japón y el quinto más potente del mundo de todos los terremotos medidos hasta hoy. Se confirmaron 15 845 muertes, 3 380 personas desaparecidas y 5 893 heridos.

En un tsunami, las olas al llegar a las costas aumentan de tamaño y disminuyen su velocidad. Es importante conocer su epicentro y la velocidad a la que se desplaza un tsunami, para que se tomen las medidas de precaución pertinentes en las poblaciones costeras (figura 1-26).

Durante un sismo, se presentan primero ondas longitudinales, llamadas primarias, y posteriormente ondas transversales, llamadas secundarias. La magnitud del sismo en la escala de Richter se determina tomando en cuenta la amplitud de las ondas y la diferencia entre el tiempo de llegada de las ondas primarias y secundarias por medio de una expresión logarítmica base 10. Esto último implica que la magnitud de un sismo aumenta 10 veces de un grado al siguiente. Por ejemplo, un sismo de grado 5 es 10 veces más intenso que un sismo de grado 4; un sismo de grado 8 será 10 000 veces más intenso que uno de grado 4.

Figura 1-26.
Tsunami.

Otro tipo de ondas, como las electromagnéticas, transportan señales que son la base de las telecomunicaciones, y son indispensables actualmente para nuestra civilización.

Sin las ondas electromagnéticas tampoco se habría podido generar nuestra concepción del universo, pues la información de su estructura se obtiene al detectar y analizar este tipo de ondas.

Actividad

Con el "resorte de gusano" y un poco de estambre, se pueden realizar algunos experimentos sencillos.

Coloque el resorte, con ayuda de un compañero frente a usted, en una superficie horizontal, manténganlo estirado y amárrale un pedazo de estambre a una de las espiras. Hágalo oscilar hacia adelante y hacia atrás, produciendo una perturbación, en la cual las partículas del medio (en este caso, las espiras del resorte) oscilan hacia adelante y hacia atrás, esto lo puede apreciar observando la espira que tiene el estambre. Por otro lado, es claro que la propagación ondulatoria avanza hacia adelante. En este experimento se están produciendo ondas longitudinales.

Ahora, si hace oscilar el resorte de izquierda a derecha sobre la mesa, observará una perturbación ondulatoria que avanza hacia adelante, mientras que cada espira sólo oscila en la dirección perpendicular a aquella en la que avanzan las ondas, esta vez, produciendo ondas transversales.

Con la ayuda del siguiente diagrama se pueden identificar algunos parámetros básicos de las ondas transversales.

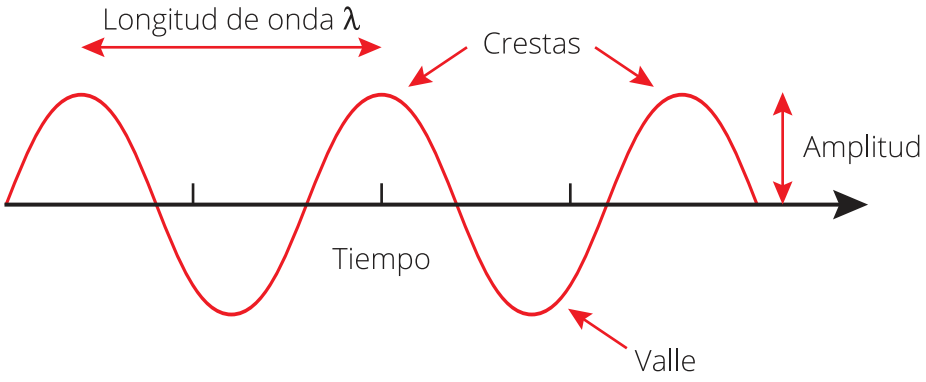


Figura 1-27.
Partes de una onda.

La distancia entre cresta y cresta se llama longitud de onda (λ), y como se mencionó, el número de ondas completas que pasan por un punto en una unidad de tiempo es la frecuencia. Si una onda completa pasa en un segundo tiene una frecuencia de un Hertz (y se denota 1 Hz). De modo que si en un segundo pasan 100 ondas, se tiene una frecuencia de 100 Hz. Una onda de radio se repite más de cien millones de veces en un segundo, es decir, tiene una frecuencia que puede llegar a más de 100 mega Hertz.

El periodo y la frecuencia están íntimamente relacionados. Por ejemplo:

- Si el periodo es de un segundo, la frecuencia será de 1 Hz.
- Si la frecuencia es de 2 Hz, es decir, ocurren dos ondas en un segundo, cada onda se completa en medio segundo y éste es su periodo.
- Si el periodo es de $^1/_{10}$ s, la frecuencia será de 10 Hz.

Por lo tanto

$$f = \frac{1}{T}$$

Es decir, cuando la frecuencia crece, el periodo decrece y viceversa, esto es, una proporción inversa.

La propagación de las ondas tiene también una velocidad, como en el caso del movimiento rectilíneo.

Para calcular la velocidad de propagación de las ondas en el resorte de gusano, se consideran n ondas de la misma longitud λ en un intervalo de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$. Las n ondas ocupan una longitud total $\Delta x = x_2 - x_1$. Dicho de otra manera: en el tiempo $\Delta t = t_2 - t_1 = nT$, las ondas habrán recorrido la distancia $\Delta x = x_2 - x_1 - n\lambda$.

Entonces, la velocidad de las ondas será:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{n\lambda}{nT} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

dado que $f = {}^{1}/_{T}$.

Si se agita el resorte de gusano lenta o rápidamente se puede aumentar o disminuir la longitud de la onda λ. Esto hace que su periodo T también varíe, disminuyendo o aumentando. Pero el cociente de la longitud de onda y el periodo, que corresponde a la rapidez de propagación ${}^{\lambda}/_{T}$ permanece constante.

Si se repite el experimento con otro tipo de resorte, por ejemplo, con uno más duro, aumenta la rapidez de propagación, y disminuye si el resorte es más blando.

Las ondas se pueden propagar en materiales líquidos, gaseosos y sólidos.

Actividad

Para comprobar que las ondas sonoras se propagan a través de la madera, apoye su oído en uno de los extremos de una mesa, mientras un compañero golpea el otro extremo.

Si imagina que un sólido está formado por átomos unidos por resortes duros, y que en un líquido, éstos están unidos por resortes blandos, entonces podrá predecir correctamente que las ondas viajan más rápido en sólidos que en líquidos.

El papel de los científicos es precisamente elaborar modelos de la realidad y así hacer predicciones. Si la realidad no se comporta como predice el modelo, habrá que desecharlo y proponer otro.

Lectura. La velocidad del sonido en el aire

La naturaleza del sonido como fenómeno físico se empezó a estudiar alrededor del año 1640, cuando el matemático francés Marin Mersenne (1588-1648) determinó su velocidad, midiendo el tiempo que tardaba en escuchar el eco en las montañas.

Hoy en día se sabe que la rapidez del sonido en el aire varía entre 330 y 340 m/s, dependiendo de la temperatura. Dadas las rústicas condiciones de trabajo, la precisión del dato de 316.38 m/s que obtuvo Mersenne es impresionante.

Imagine un peatón que pasa frente al patio de una escuela y oye los gritos y risas de los estudiantes, a pesar de la gruesa barda que la rodea. A este efecto del so-

nido doblando esquinas y saltando bardas, se le llama *difracción* y es tan común que poca gente le presta atención.

La difracción por obstáculos se puede presentar cuando las dimensiones de éstos son aproximadamente del tamaño de la longitud de onda del sonido. Ésta es de cerca de un metro, en tanto que las dimensiones de las ventanas y puertas también lo son.

Pero si la longitud de onda es muy pequeña comparada con los obstáculos, la onda no los rodea, es decir no se difracta. Entonces produce una "sombra de sonido" de puertas y ventanas muy bien definida.

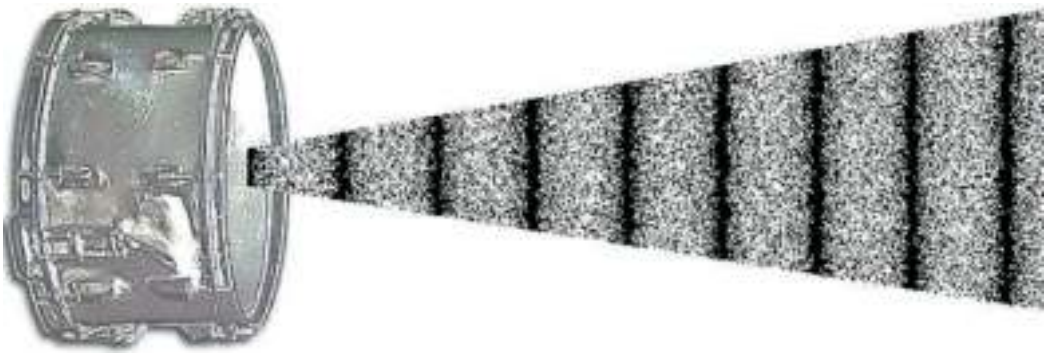


Figura 1-28. Ondas saliendo de la superficie de un tambor. Más oscuro, mayor densidad; menos oscuro, menor densidad del aire.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre una superficie, una parte de su intensidad es absorbida y el resto se refleja. Las ondas sonoras son absorbidas por las superficies blandas; por ejemplo, las cubiertas con materiales como fieltro, corcho, algodón o alfombra, que se utilizan para recubrir las paredes de teatros y cines, mientras que las ondas sonoras son reflejadas por superficies duras y pulidas.

Las perturbaciones en el aire producidas por las vibraciones de un objeto, por ejemplo, las generadas por la superficie de un tambor, se propagan longitudinalmente. En la figura podrá observar que las franjas oscuras corresponden a una capa de alta densidad de aire, y las claras a una capa de baja densidad. Robert Hooke (1635-1703), físico inglés contemporáneo de Newton, hablaba en 1680 del *"resorte del aire"*, para indicar que su compresión se parecía a la compresión de un resorte.

Actividad

Acerque su oído a un tubo largo de metal, como el barandal de una escalera. Pida a un compañero que golpee el barandal con algo sólido, una piedra o una llave, y observe si capta primero la onda transmitida por el tubo de metal o la transmitida en el aire.

El oído de un adulto puede captar vibraciones con frecuencias entre 15 y 15 000 Hz, mientras que un niño puede escuchar vibraciones hasta de 20 000 Hz.

Las vibraciones con frecuencias menores de 15 Hz y mayores a 20 000 Hz no se oyen, y se las llaman infrasónicas y ultrasónicas, respectivamente. Algunos animales, como los perros y los murciélagos pueden captar vibraciones ultrasónicas.

Como se mencionó, al aumentar la frecuencia, la longitud de la onda disminuye, lo que hace desaparecer la difracción de la onda y ésta empieza a ser reflejada nítidamente por objetos cada vez más pequeños. Es por eso que un murciélago emitiendo ondas con frecuencias de hasta 150 000 Hz puede captar el eco proveniente de insectos menores a 1 cm de longitud, así como detectar obstáculos.

Actividad

Con los datos anteriores, calcule la longitud de onda del sonido que emite el murciélago.

Ahora se estudiará cómo cambia la frecuencia de vibración o tono de una cuerda estirada al cambiar su longitud. Ésta depende de varios factores: su longitud, su diámetro, su densidad y la fuerza aplicada para tensarla.

En la primera mitad del siglo XVII Galileo Galilei y el francés Marin Mersenne, estudiaron experimentalmente y determinaron la relación entre la frecuencia y las cuatro variables mencionadas, manteniendo constantes tres de ellas (diámetro, densidad y fuerza aplicada para tensar la cuerda), variando sólo la longitud.

Este experimento puede realizarse fácilmente y obtener la relación entre la frecuencia de vibración y la longitud de la cuerda. Bastará controlar la tensión para medir longitudes y frecuencias. El resultado que se obtiene lo conocen bien los músicos de instrumentos con cuerdas de igual longitud como el violín o la guitarra. La frecuencia de vibración de una cuerda bajo tensión constante varía de manera inversa con su longitud. A menor longitud mayor frecuencia o tono, y viceversa:

$$f \propto \frac{1}{L}$$

Un violinista presiona la cuerda con el dedo en el punto deseado y con ello determina la longitud de la cuerda y, por lo tanto, el tono que obtendrá al pasar el arco por ella.

Las ondas ultrasónicas en diferentes medios de propagación tienen aplicaciones importantes en medicina, industria y control de tráfico vehicular. El efecto en que se basan estas aplicaciones es el cambio de frecuencia de la onda al ser reflejada por un objeto en movimiento, conocido como efecto Doppler.

Lectura. El efecto Doppler

Si se deja caer algo en una capa de agua quieta, se ve que se forman ondas circulares concéntricas que se alejan del punto de perturbación. Ahora, si se genera una onda metiendo en el agua una vara o la punta del lápiz, que se desplaza lentamente dentro del agua, se observa que las ondas delante del lápiz se amontonan (aumentando su frecuencia), mientras que atrás tienden a separarse (disminuyendo su frecuencia). A este cambio de frecuencia de la onda debido al movimiento de la fuente se le llama efecto Doppler, y ocurre también con el sonido y la luz. En el sonido se nota porque cambia su tono, con la luz cambia su color. El modelo matemático para determinar la frecuencia que detecta el observador cuando la fuente sonora se acerca es el siguiente:

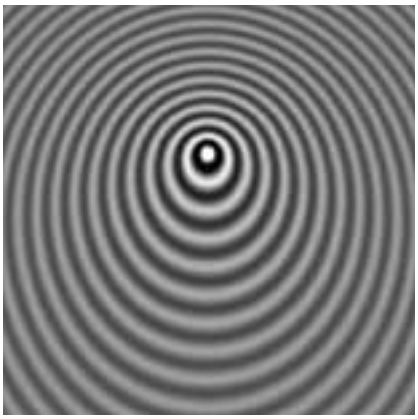


Figura 1-29. Efecto Doppler, ondas en agua.

$$f_0 = \frac{v_s}{v_s - v_f} f,$$

donde v_s es la velocidad del sonido, v_f es la velocidad de la fuente, y f es su frecuencia original. La dependencia de la frecuencia con la velocidad de la fuente, convierte a este fenómeno en un poderoso instrumento de medición de velocidades de diversas fuentes, como estrellas y galaxias.

El estudio de las vibraciones en el aire es importante por varias razones. En particular porque mediante ellas nos comunicamos: las palabras son producidas por la vibración de nuestras cuerdas vocales (figura 1-30). Con sus dedos presionando su garganta, al tiempo que emite un sonido, puede percibir la vibración de sus cuerdas vocales. Estas cuerdas son como dos lengüetas, ubicadas en un mismo plano horizontal, con una longitud promedio de 2.0 cm en los hombres adultos y de 1.25 cm en las mujeres. Los notables cambios de voz en los niños al pasar a la adolescencia, se deben a que en un tiempo relativamente breve, prácticamente duplican esta longitud.

Cuando no pasa aire por estas cuerdas, están separadas unos pocos milímetros, y al respirar se abren ampliamente. Comienzan a vibrar debido a corrientes de aire que llegan a ellas desde los pulmones, pasando por la tráquea, produciendo una interrupción periódica del flujo de aire. Como se mencionó anteriormente, el tono de la nota producida depende del grosor, la tensión y la longitud de las cuerdas, factores que pueden ser variados por los músculos que empleamos al hablar.

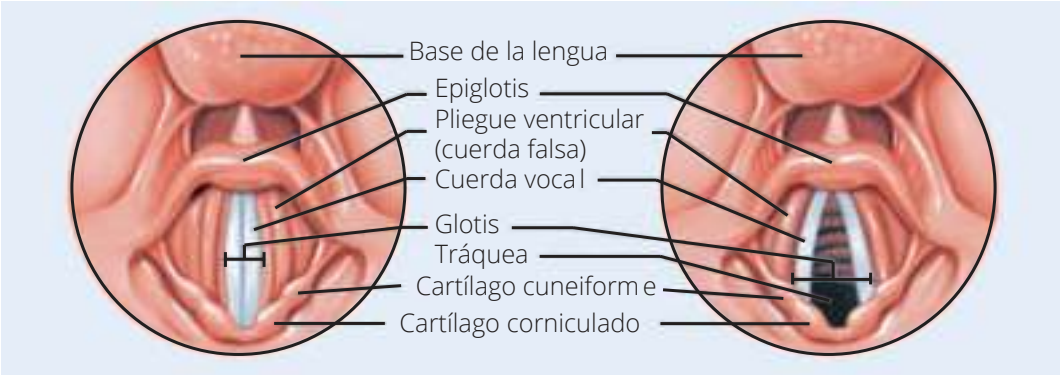


Figura 1-30.
Diagrama de las cuerdas vocales.

La voz en los hombres adultos tiene una frecuencia promedio de aproximadamente 145 Hz, con un rango de 12 tonos; en tanto que en las mujeres tiene una frecuencia promedio de 230 Hz, con un rango similar de tonos.

1.1 | El trabajo de Galileo

Explicaciones de Aristóteles y Galileo acerca de la caída libre

Se estudiará el movimiento de los cuerpos que caen. Si se piensa en una hoja de papel extendida que cae libremente, ¿será su velocidad constante?, ¿cómo será su velocidad si se le cambia la forma?

Actividad

1. Deje caer, desde la misma altura, varios objetos: una hoja de papel, en varias formas (extendida, formando un cono, una bola, etc.), una canica, piedras de varios tamaños y formas, pelotas, etcétera.
   - ¿Cuál llega primero al piso?

2. Ahora, haga dos pelotas del mismo tamaño, pero de diferente material, por ejemplo, una con papel normal y otra con papel aluminio:
   - ¿Cuál llega primero al piso?

3. Construya ahora dos pelotas con hojas de papel de igual tamaño, una muy chica, apretándola al máximo y otra sin apretar demasiado, ¿cuál llega primero al suelo?, ¿y si junto con ellas deja caer una hoja extendida horizontalmente?
   - ¿Qué está pasando? ¿Puede sacar alguna conclusión de estas experiencias?
   - ¿Piensa que la rapidez de caída de estos objetos depende de la forma que se les dio? ¿El aire interviene en la explicación de esta diferencia?

Quizá haya visto volar a los zopilotes y observado que se mantienen en el aire sin aletear, ¿qué los mantiene suspendidos?

¿Ha sacado su mano del coche en movimiento y sentido la presión del aire? Tal vez hasta ha puesto su mano con la palma contra el viento, o la ha situado horizontalmente con los dedos hacia delante, apreciando que en el primer caso

Figura 1-31. Tubo al vacío, con pluma y canica cayendo al mismo tiempo.

el empuje del aire es mucho mayor que en el segundo. Si no lo ha hecho, inténtelo. ¿Cómo explica esta diferencia?

Puede imaginar un experimento donde a un tubo de vidrio o plástico se le extrae el aire, entonces, si dentro del tubo deja caer dos objetos como una pluma de ave y una canica, observaría que llegan al piso al mismo tiempo.

De estas experiencias, se pueden obtener dos conclusiones: por un lado, que los objetos en el aire tardan tiempos diferentes en caer, dependiendo de su forma y composición. Y por otra parte, que cuando no hay aire, todos los objetos llegan al piso en el mismo tiempo, sin importar su forma y composición.

Ahora, se puede complicar un poco más el problema del movimiento de los cuerpos al caer sobre la superficie de la Tierra, considerando otros tres movimientos que puede fácilmente observar en la siguiente actividad.

Actividad

Sumerja una pelota de frontón, de *ping-pong* o una esfera de madera en un recipiente con agua, hasta donde llegue su brazo, ¿cómo se mueve cada una de ellas al soltarlas?

Observe el movimiento de un globo que flota en el aire al soltarlo libremente en la atmósfera.

Prenda una vela, ¿hacia dónde se dirige la flama?

Realice ahora la actividad siguiente.

Actividad

Deje caer una piedra desde la altura de su pecho, ¿qué sucede?

Sostenga un vaso con agua enfrente de usted, a la altura del pecho. Después incline el vaso hacia un lado hasta ponerlo horizontal, ¿qué pasa con el agua?

¿Con qué criterio clasificaría los movimientos observados? Trate de explicar estos movimientos.

El estudio de estos y otros movimientos ha dado lugar, desde la antigüedad, a diversas e interesantes explicaciones.

En el caso de la caída de un filtro de papel para café, la representación de su movimiento vertical en el diagrama (x, t) es, aproximadamente, como se muestra en la figura 1-32.

Ahora se mostrará otro tipo de diagrama para la caída del filtro de café, en el cual se representa la rapidez y el tiempo en un espacio cartesiano. Con esta nueva descripción y con la representación en (x, t), que ya se discutió, se logra una mejor descripción del movimiento.

En el eje vertical se representa la rapidez (v), y en el horizontal nuevamente al tiempo (t). Como se observa en la figura, al movimiento de la caída del filtro corresponde una línea horizontal; eso quiere decir que la rapidez no cambia con el paso del tiempo, es decir la rapidez es constante (figura 1-33).

Ahora se estudiará un movimiento de caída más complejo. Del tiempo t_0 al tiempo t_1 un objeto se mueve con una rapidez v_1, del tiempo t_1 al tiempo t_2, con una rapidez v_2 mayor que v_1; del tiempo t_2 al tiempo t_3 con una rapidez v_3 mayor que v_2 y así sucesivamente.

Como se puede observar en la figura 1-34), la rapidez es constante en cada uno de los intervalos de tiempo, siendo mayor en cada uno de ellos. Imagine ahora que los intervalos de tiempo son cada vez más pequeños, entonces las líneas horizontales se convierten en puntos (figura 1-35). Si éstos se unen, se obtiene una recta con una cierta inclinación (figura 1-35). A la inclinación se le llama *aceleración*, que en este caso es constante, es decir, no cambia con el paso del tiempo.

Pero ¿cómo sería la correspondiente gráfica (x, t) para este movimiento? Recuerde que cuando se estudió el movimiento con velocidad constante, se vio que su gráfica (x, t) es una recta cuya inclinación es proporcional a la rapidez (figura 1-35). Como la rapidez es mayor en cada intervalo de tiempo, la inclinación de la recta en cada intervalo de tiempo será cada vez mayor.

¿Qué pasa si los intervalos de tiempo son otra vez muy pequeños? Ahora las rectas inclinadas se convierten en puntos que forman una curva creciente.

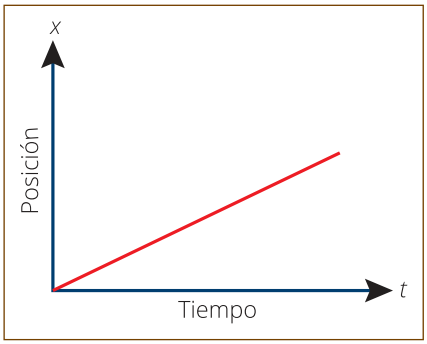


Figura 1-32. Representación en (x, t) de un movimiento rectilíneo a rapidez constante.

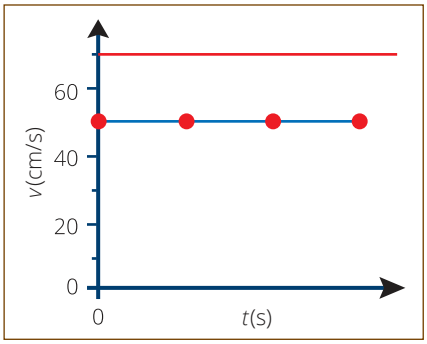


Figura 1-33. Diagrama (v, t), con v constante una con puntos y la otra uniendo los puntos.

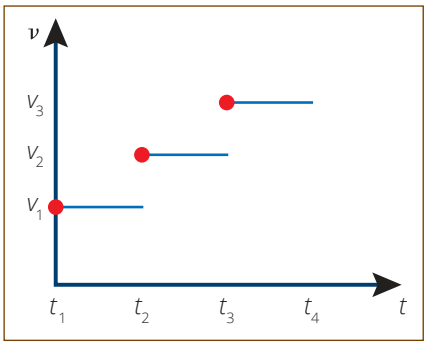


Figura 1-34. El movimiento anterior en (v, t).

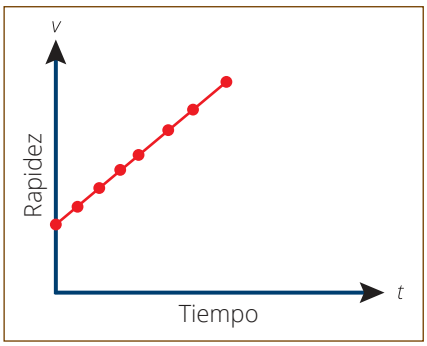


Figura 1-35. El movimiento anterior en (v, t) una recta.

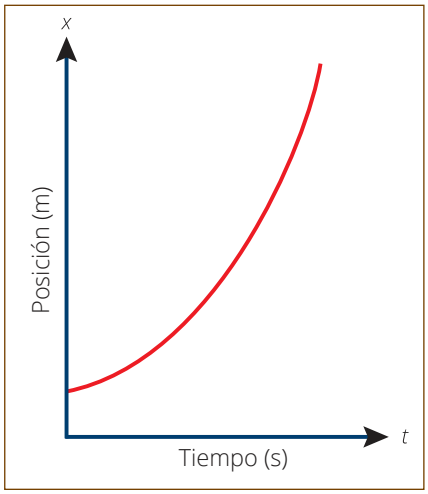


Figura 1-36.
El movimiento anterior en (*x*, *t*).

En la figura 1-36 se representa el movimiento de un objeto que se acelera uniformemente (aceleración constante), ya que su rapidez aumenta en proporción directa con el tiempo.

Se dice que un objeto en movimiento rectilíneo se acelera cuando aumenta su rapidez, y que se desacelera cuando su rapidez disminuye.

¿Cómo representaría un movimiento uniformemente desacelerado, por ejemplo el movimiento de un paracaidista?

Habrá visto en películas o en la televisión que para disminuir la rapidez con la que cae una persona que se lanza desde un avión, ella se sitúa en posición horizontal, mirando hacia abajo, abriendo piernas y brazos. De esta manera su cuerpo presenta mayor resistencia al aire. Al cabo de un rato alcanza una rapidez de caída constante, que se llama *velocidad terminal*; ésta es tan grande que si no abriera su paracaídas se estrellaría contra el suelo. Al abrir el paracaídas, la persona experimenta una súbita desaceleración, que le hace alcanzar otra velocidad terminal mucho menor que la que antes llevaba, con la cual puede llegar al suelo sin peligro.

Actividad

Dibuje los movimientos del paracaidista en el plano (*v*, *t*). Ubique el punto correspondiente a la apertura del paracaídas.

A diferencia de la Tierra, en la Luna no hay atmósfera. ¿Puede imaginar lo que sucedería si alguien se avienta en paracaídas sobre la superficie de la Luna?, ¿habría una velocidad terminal? En la historia de la ciencia se registran diferentes respuestas al estudio del movimiento de los objetos sobre la superficie de la Tierra, empezando por el problema de la caída de los cuerpos en presencia del aire. La caída en el vacío es imaginada hasta el siglo XVII, en Europa, sobre todo a partir del invento de la bomba de vacío en 1650 por Otto von Guericke (1602-1686).

Otro ejemplo es el movimiento de piedras lanzadas a mano o por hondas; de hecho, el invento de la honda es una muestra de la existencia de la solución a una necesidad.

En algunas culturas antiguas se pensaba que algunos fenómenos, como el viento o la lluvia, eran ocasionados por agentes invisibles o dioses. Éstos tenían que existir, pues todo movimiento, por ejemplo, de piedras, humo, aire, agua, debería ser provocado por alguien que los lanzaba o jalaba. El viento era aire

empujado, la lluvia agua lanzada desde arriba, los truenos fuego arrojado desde el cielo, etcétera.

Es una fortuna contar con el registro escrito de algunos pensadores griegos, como Aristóteles (384-322 a.c.), quien en su libro titulado *Física*, trató el problema del cambio y el movimiento. Aristóteles se basaba en la observación de hechos en la vida cotidiana, formulando suposiciones que constituían una *representación* o *modelo* de la naturaleza. A partir de las suposiciones explicaba los hechos observados y hacía *predicciones*.

El modelo desarrollado por Aristóteles no supone la acción de ningún agente externo para explicar el movimiento natural de los objetos, sino que todos los movimientos son debidos a agentes o causas naturales. Su atención se centraba en el movimiento de objetos de su entorno, como el de piedras, lanzas y flechas, el vapor de agua, el viento, una llama, la lluvia, los astros, etc. Aristóteles trató de explicar estos movimientos mediante una sola suposición, la de que todos los objetos tienden a moverse hacia su lugar natural. De acuerdo con él, hay distintos lugares naturales, según sea la composición de los objetos. Además él sostenía que todos los objetos están formados de cuatro elementos básicos o fundamentales: tierra, agua, aire y fuego.

La tierra y las piedras tienen como lugar natural el centro de la Tierra. Por eso nuestro planeta asume la forma que tiene, ya que, si sus partes se van aglomerando tendiendo hacia su centro, no puede tener otra forma que la esférica. Si a los objetos terrosos como una piedra, se la suelta de la mano, inmediatamente tenderá a caer hacia su lugar natural, el suelo. Pero ¿qué sucede cuando una piedra se lanza hacia arriba? ¿Por qué se mueve en sentido contrario al sitio donde está su lugar natural? Supuso que si la piedra se lanza hacia arriba, estará dotada de un impulso proveniente del aire detrás de ella. El impulso inicial es ocasionado por la mano y desaparece en el momento en que el movimiento del aire detrás de la piedra se desvanece, para entonces irremediablemente caer hacia su sitio natural.

Los objetos terrosos, siendo más pesados que el agua, la van expulsando hacia arriba, obligándola a acumularse por encima de ellos. Por eso los lagos, mares y ríos están naturalmente situados sobre la superficie de la Tierra.

El aire, al ser más ligero que la tierra y que el agua, tiende a ir hacia arriba de ellas, formando la atmósfera.

El fuego, al ser más ligero que los tres elementos anteriores, tiende a elevarse hacia la parte superior de la esfera de aire, es decir, se situará en el extremo superior de la atmósfera. Ésa es la razón de que las lengüetas de una llama apuntan hacia arriba.

Se tiene entonces que el modelo de Aristóteles consta ahora de objetos que están compuestos de combinaciones de los cuatro elementos y que ellos se mueven hacia su lugar natural. En un mundo organizado así, primero se tiene la esfera de la Tierra; a ella la rodea en gran parte la capa esférica del agua; por encima de ella está la capa esférica del aire y, finalmente, en la parte superior se sitúa la capa del fuego.

Actividad

Considerando lo dicho en el párrafo anterior, ¿en cuál o cuáles esferas del modelo aristotélico ocurren los relámpagos, truenos, lluvia, vapor?

Respecto al movimiento de una piedra que se lanza hacia arriba, Aristóteles decía que el impulso dado a la piedra se transmitía al aire y que éste empujaba a la piedra a lo largo de su trayectoria, llenando el vacío que se formaba detrás de ella, el cual era inmediatamente ocupado por el aire, manteniendo así el impulso. Conforme éste se transmitía punto a punto en el aire, se iba debilitando, de modo que el movimiento natural de la piedra se iba haciendo cada vez más dominante. El movimiento hacia arriba disminuía, transformándose eventualmente en un movimiento hacia abajo, hasta que la piedra quedaba de nuevo en reposo en el suelo. Ni la fuerza del brazo, ni la de una catapulta podrían, a la larga, vencer el movimiento natural de la piedra.

Para Aristóteles el movimiento es un proceso que inevitablemente termina en el reposo, es decir, en la ausencia de movimiento. Desde el punto de vista del movimiento, fue una teoría física elaborada por una de las mentes más grandes que han existido en la historia de la humanidad.

Y bien, si la visión de Aristóteles parecía lógica y útil, ¿por qué fue remplazada? Si era "incorrecta", ¿por qué tanta gente inteligente la aceptó como "verdadera" durante tanto tiempo?, ¿cómo fue que se aceptó que era "incorrecta"?

Las dudas sobre una teoría empiezan a surgir cuando se detectan contradicciones. Con esto se quiere decir que de ella se pueden deducir dos conclusiones contrapuestas.

Por ejemplo, una piedra en agua cae más lentamente que en aire. Se podría deducir de aquí que cuanto menos densa es la sustancia a través de la que cae la piedra, más rápido se mueve en busca de su lugar natural. Así que si cae a través de nada, o sea en vacío, entonces se movería con rapidez infinita. Algunos estudiosos plantearon la situación y, puesto que pensaban que adquirir una rapidez infinita era imposible, el argumento probaba que no existiría tal cosa como el vacío.

El punto de vista aristotélico, por otra parte, es que el aire empuja a la piedra en el sentido que es lanzada. Si no hubiera aire sino sólo vacío, nada empujaría a la piedra. Así que: una piedra en el vacío, ¿se moverá con rapidez infinita o no se moverá? Se puede argumentar igualmente en un sentido que en el otro.

A pesar de lo anterior, el modelo de Aristóteles parecía predecir y explicar tantas cosas que fue aceptado durante los dos mil años siguientes, ya que los defensores de la teoría aristotélica encontraban argumentos para apoyarla.

Actividad

Deje caer dos piedras de pesos notablemente diferentes. Meta ahora las dos piedras firmemente apretadas dentro de una bolsa y déjela caer. Observe el tiempo de caída en ambos casos.

De acuerdo con el modelo aristotélico, la piedra más pesada tiene una tendencia mayor a alcanzar su lugar natural y, en consecuencia, caerá más rápido que la menos pesada. Si así fuera, entonces la rapidez de caída de la bolsa tendría un valor intermedio, menor que la rapidez de la piedra más pesada cayendo sola y mayor que la rapidez de la de menor peso cayendo sola. Por otra parte, se podría alegar que las dos piedras juntas en la bolsa forman un conjunto con peso mayor y que, según el modelo aristotélico, debe caer más rápido que la piedra más pesada.

Se tienen dos predicciones que no sólo son distintas sino contradictorias, surgidas del mismo modelo. Pareciera que ambas son correctas.

De la observación, ¿estaría de acuerdo con alguna de las dos predicciones?, ¿se le ocurren argumentos que solucionen la contradicción?

Regresando al caso de las dos piedras, se observa que la presión sobre la mano que sostiene a la piedra más pesada es mayor que la que ejerce la piedra de menor peso. Esto quiere decir, de acuerdo al modelo aristotélico, que la tendencia hacia su lugar natural es mayor en un caso que en otro. ¿Estaría de acuerdo en que la rapidez de caída de la primera piedra será mayor que la de la segunda?

¿Se puede probar esto? ¿Por qué no medir exactamente la rapidez con que caen los dos objetos, para determinar si de verdad la piedra de mayor peso cae más rápido que la de menor peso? Si esto no sucede, entonces la teoría del movimiento tendría que ser modificada. Pero si la piedra de mayor peso cae más de prisa que la de menor peso, entonces la teoría debe aceptarse.

¿Qué habría pensado Aristóteles de su teoría si hubiese hecho el experimento de caída de una hoja de papel, primero en la forma original y luego hecha bola? ¿Qué piensa de la teoría de Aristóteles, a la luz del resultado de este experimento?

¿Por qué cree que los griegos de aquellos tiempos no realizaron experimentos, como el de la hoja de papel, que seguramente les habrían ayudado a perfeccionar sus teorías del movimiento de los cuerpos?

Los griegos, al igual que la mayoría de los estudiosos medievales europeos, aparentemente se contentaban con la belleza lógica de las teorías que formulaban, no les preocupaba someterlas a la prueba experimental. Excepciones notables en estos aspectos experimentales fueron Arquímedes (nacido alrededor del año 287 a.c.) y Herón (quien vivió en el siglo I de nuestra era).

Actualmente, la forma definitiva de someter a prueba una teoría consiste en obtener una conclusión necesaria de ella y luego confrontarla con el experimento, tan exactamente como sea posible.

De manera especial, el nuevo pensamiento, desarrollado a partir del Renacimiento europeo, empezó a basarse en la necesidad de la experimentación. Es decir, se trataba de la observación del comportamiento de los objetos, de forma planeada de antemano y también bajo condiciones controladas. La experimentación sobre el movimiento implicaba la medición de lo observado, que representó una gran diferencia respecto al método aristotélico, que se basaba en una descripción cualitativa. Y la medición, a su vez, hace uso del lenguaje matemático, de modo que la nueva física pasa de ser sólo cualitativa a ser también cuantitativa. En este aspecto fue notable la contribución de Galileo Galilei.

Galileo, a diferencia de Aristóteles, realizó experimentos concretos, dejando caer objetos bajo condiciones controladas, como el que describe en uno de sus libros sobre el rodamiento de un balín en un canal inclinado de madera, forrado de cuero pulido. Pero también hace experimentos pensados; éstos se refieren a situaciones ideales, inalcanzables en la realidad, como son el deslizamiento de balines en canales sin fricción, o la caída de objetos en ausencia de aire. En relación con la caída de los *graves* (o sea, los objetos que son atraídos hacia el centro de la Tierra) Galileo manejó un modelo formado por conceptos, hipótesis y métodos muy alejados de los propuestos por Aristóteles.

Galileo supuso que todos los cuerpos en el vacío caen con la misma rapidez hacia el centro de la Tierra. Y si se les deja caer al mismo tiempo desde la misma altura, llegarán al suelo simultáneamente. Lo anterior quiere decir que, en el vacío, las bolas de madera, metal, plumas de ave, etc. caerán al mismo tiempo al suelo. Pero Galileo fue más adelante, pues pudo describir el movimiento de caída de los graves en el vacío. Primero supuso, erróneamente, que la rapidez de caída era proporcional a la distancia. Varios años estuvo estacionado en ese error, hasta que se dio cuenta de que el movimiento se caracteriza, de manera "natural", por el tiempo en vez de la distancia. Esto le llevó a proponer que la rapidez de caída es proporcional al tiempo, resultado aparentemente ya conocido por Leonardo da Vinci (1452-1519).

Aportación de Galileo en la construcción del conocimiento científico

El movimiento de caída libre es uniformemente acelerado; la distancia y el tiempo de caída se relacionan de una manera muy especial, que Galileo expresó con la siguiente frase, un tanto oscura, en una carta dirigida a un colega veneciano, el 16 de octubre de 1604:

> Los espacios atravesados por el movimiento natural están en proporción doble del tiempo y, por consiguiente, los espacios atravesados en tiempos iguales son como los números impares *ab unitate*.

¿Qué quiso decir con esto Galileo? Para explicarlo, habrá que observar la figura 1-37:

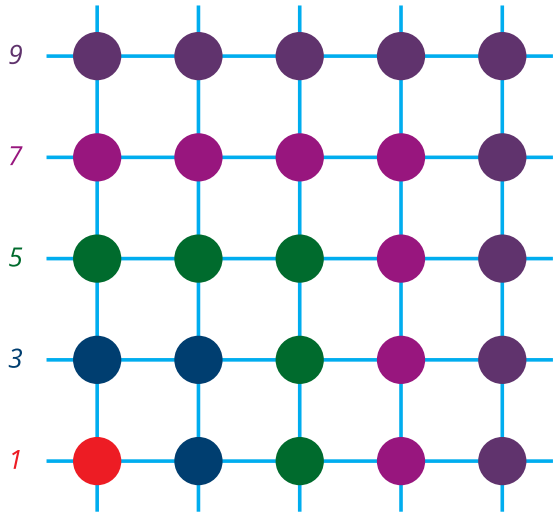


Figura 1-37.
Serie pitagórica.

Entre un elemento de la serie de los números impares (por ejemplo el 5) y el siguiente (el 7, en este caso) transcurre un intervalo igual de tiempo. La distancia recorrida es proporcional a la cantidad de puntos de cada cuadrado, es decir es proporcional al cuadrado del tiempo (Galileo dice en "proporción doble del tiempo"). Cada cuadrado se construye sumando al anterior un número de la serie de los números impares, empezando por la unidad (*ab unitate*, dice Galileo en latín). En conclusión, la distancia recorrida durante la caída del grave es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido.

Y lo sorprendente es que la relación entre distancias y tiempos de caída de cualquier objeto en el vacío se ajusta exactamente a la descripción geométrica pitagórica. Esto lo expresaba Galileo diciendo que: "el lenguaje de la naturaleza es la geometría".

De este modo propuso un método o procedimiento para acercarse a las verdades de la naturaleza: observar el fenómeno en cuestión (como el movimiento de los graves), hacer alguna hipótesis respecto a dicho movimiento (por ejemplo, que la rapidez de caída es proporcional al tiempo y no depende del peso del objeto), deducir una consecuencia de la hipótesis o predicción (que la distancia recorrida cambia como en la figura anterior) y someterla a la prueba experimental.

La hipótesis de Aristóteles era que los objetos pesados caerían más rápido que los ligeros, mientras que la suposición de Galileo era que el peso no influye. De acuerdo con el nuevo método científico, es la naturaleza quien responde cuál de las dos hipótesis es la verdadera, cuando se le pregunta mediante un experimento bien pensado y controlado, tomando medidas cuantitativas. Así es que la naturaleza tiene la última palabra y se expresa en el lenguaje matemático.

Al hacer el experimento, Galileo se dio cuenta de que el tiempo de caída vertical era demasiado rápido, y no podía medirlo con su pulso o algún otro procedimiento conocido. Entonces intentó modificar las condiciones de control de tal forma que el tiempo de caída disminuyera, sin cambiar por ello la esencia del fenómeno. Fue así como concibió el experimento en que balines de pe-

sos diferentes se dejaban caer por un canal situado en un plano inclinado. En su descripción del experimento, afirma que el tiempo de recorrido del balín sobre el canal lo medía mediante un reloj de agua. Con esas medidas, Galileo pudo comprobar la predicción extraída de su hipótesis, que la rapidez de caída variaba directamente con el tiempo.

Actividad

Trabajando en equipo con sus compañeros, repita el experimento de Galileo y, con un cronómetro, trate de hallar la relación entre la distancia recorrida por el balín y el tiempo transcurrido desde que lo suelta, primero verticalmente y después desde la parte superior del canal del plano inclinado.

La aceleración, diferencia con la velocidad

En diversos ámbitos se usa la palabra aceleración, por ejemplo, en química se habla de acelerar una reacción, cuando se hace referencia a que se realice en menor tiempo del ordinario. En relación con el tan mencionado cambio climático, se habla de que se está acelerando el deshielo de los glaciares. En la economía, se habla de aceleraciones y de desaceleraciones para referirse a variaciones en la velocidad de crecimiento de algunos indicadores económicos de los países. Así pues, la aceleración en la vida cotidiana está relacionada con el cambio en la rapidez de algún fenómeno y con el tiempo en que ocurre dicho cambio.

Este concepto de aceleración concuerda con el que se tiene en física para el movimiento de los cuerpos; sólo que en esta disciplina, todo cambio en el vector velocidad implica una aceleración; esto es, existe aceleración en un cuerpo si su velocidad cambia en magnitud (rapidez), en su orientación, o en ambas. Para el caso de un cuerpo moviéndose en trayectoria rectilínea, la velocidad y la rapidez coinciden. Se define la aceleración como el cociente del cambio de velocidad entre el tiempo empleado en dicho cambio. Esto es, si el cambio de velocidad se define como $\Delta v = v_2 - v_1$ y el intervalo de tiempo empleado, como $\Delta t = t_2 - t_1$, entonces la aceleración, a, se expresa como:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Las unidades para la aceleración, en el Sistema Internacional de Unidades son unidades de velocidad entre unidades de tiempo; esto es:

$$\frac{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Así pues, la aceleración está directamente relacionada con el cambio en la velocidad e inversamente relacionada con el tiempo empleado.

Interpretación y representación de gráficas: velocidad-tiempo y aceleración-tiempo

De aquí se tiene que:

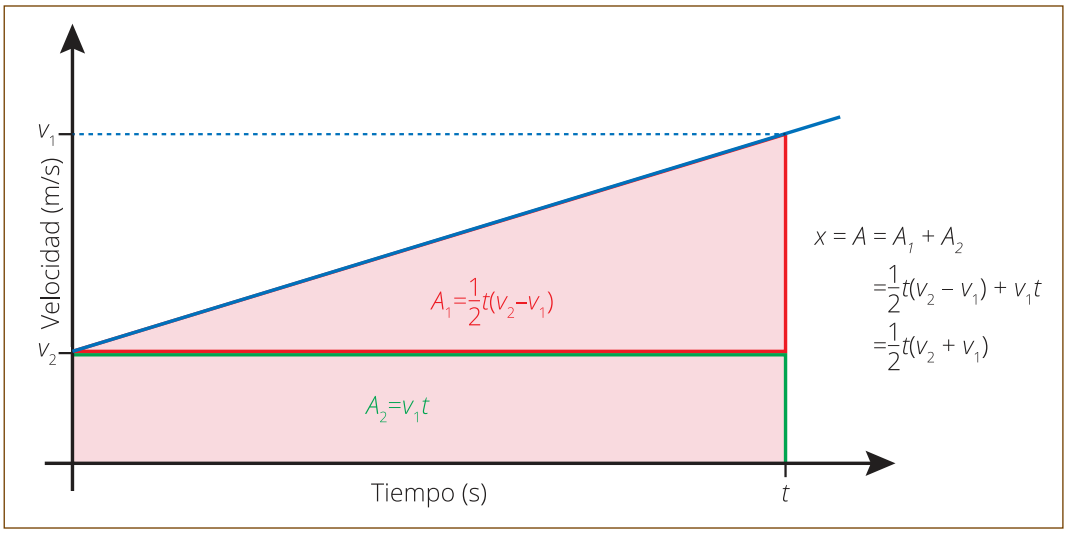


Figura 1-38. Gráfica (v vs. t) y (x vs t).

$$a(t_2 - t_1) = v_2 - v_1$$

y se considera $t_1 = 0$ y $t_2 = t$, entonces:

$$at = v_2 - v_1$$

De la figura anterior, y considerando que en una gráfica v vs. t el área bajo la curva es igual a la distancia recorrida, se tiene que la distancia recorrida en este intervalo de tiempo es:

$$x = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)t$$

pero

$$t = \frac{v_2 - v_1}{a}$$

Sustituyendo este valor de t en x se tiene:

$$x = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)\left(\frac{v_2 - v_1}{a}\right)$$

de donde

$$2ax = v_2^2 - v_1^2$$

Galileo estudió el movimiento de los cuerpos sin preocuparse por sus causas; al estudio del movimiento en estas condiciones se le llama *cinemática*.

Actividad

El propósito es estudiar el movimiento de un cuerpo cuya velocidad cambia uniformemente con el tiempo, usando la fotografía de exposición múltiple, de un balín en caída libre.

Una fotografía de exposición múltiple es también conocida como fotografía estroboscópica, pues para su obtención se empleaba inicialmente un dispositivo conocido como estroboscopio. Es aquella en la que en una sola fotografía aparecen imágenes correspondientes a diversas posiciones de un mismo objeto, tomadas a intervalos de tiempo iguales. Se usan para estudiar el movimiento de algunos cuerpos.

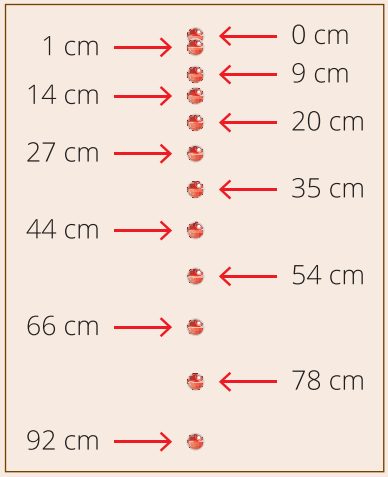


Figura 1-39. Fotografía de exposición múltiple de un balín en caída libre.

Después de soltar el balín (desde la posición 0 cm), se pueden ver las posiciones sucesivas del mismo en cada exposición en tiempos regulares; el intervalo de tiempo entre una imagen y la siguiente es de $^1/_{30}$ de segundo.

En la fotografía se puede leer la posición del balín.

¿Qué puede decir de las distancias recorridas por el balín en los intervalos de tiempo sucesivos?

Se sabe que la rapidez media es

$$v_m = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Dado que los intervalos de tiempo Δt son iguales, se puede ver de la fórmula anterior que el tamaño de la rapidez media depende sólo del tamaño de Δx en cada intervalo. Dos posiciones consecutivas del balín en la fotografía señalan el tamaño del desplazamiento en el intervalo correspondiente, el cual es a su vez proporcional a la rapidez media.

En la siguiente tabla de datos se muestran las distancias recorridas (x) y los tiempos empleados (t) en la caída libre del balín, y la correspondiente "x en función de t".

Como puede notar, la distancia está medida en centímetros, y el tiempo en lo que llamaremos "tics", y entonces un "tic" es igual a $^1/_{30}$ segundos. Se dan datos a partir del tic número 4, y hasta el número 12.

t (tics)	x (cm)
0	0
1	—
2	—
3	—
4	8
5	13
6	19
7	26
8	35
9	45
10	56
11	68
12	81

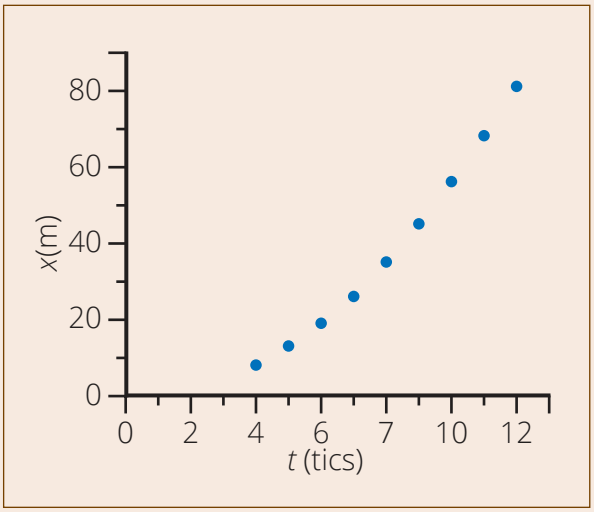


Figura 1-40. Datos y gráfica.

Represente ahora esta tabla de datos, agregando tres columnas en blanco. En la nueva columna, junto a la de t, anote los sucesivos intervalos de tiempo. Como ejemplo, en la siguiente tabla se han anotado los primeros valores. Complete los datos de esta columna. Recuerde que el tamaño de un intervalo de tiempo es $\Delta t = t_f - t_i$.

En la nueva columna, justo a la derecha de x, anote los sucesivos desplazamientos Δx. Como ejemplo, se han anotado ya los primeros valores. Complete los datos de esa columna. Recuerde que el tamaño de un desplazamiento, en este movimiento rectilíneo, es $\Delta x = x_f - x_i$.

Δt (tic)	t (tic)	x (cm)	Δx (cm)	v_m (cm/tic)
	0	0		
1			-	–
	1	–		
1			-	–
	2	–		
1			-	–
	3	–		
1			–	–

Δt (tic)	t (tic)	x (cm)	Δx (cm)	v_m (cm/tic)
	4	8		
1			5	5
	5	13		
1			6	6
	6	19		
	7	26		
	8	35		
	9	45		
	10	56		
	11	68		
	12	81		

Dado que en un movimiento rectilíneo la rapidez media es

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

calcule el valor de la velocidad media para cada intervalo de tiempo y anótelo en la nueva columna, a la derecha de Δx. Nuevamente se han anotado los primeros valores. Complete esa columna.

En ella ha anotado la rapidez media del balín en caída libre para cada intervalo de tiempo, y con estos datos puede construir la siguiente tabla de "t vs. v_m".

t (tic)	v_m (cm/tic)
0	
	—
1	
	—
2	
	—

t (tic)	v_m (cm/tic)
3	
	—
4	
4.5	5
5	
5.5	6
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Como puede notar en esta tabla, 4.5 tic es el valor de tiempo que corresponde a la mitad del intervalo que va de 4 a 5 tic; a ese valor de tiempo se le asigna la rapidez media de este intervalo que es 5 $^{cm}/_{tic}$.

Ahora, con los datos de la tabla anterior, grafique "v_m en función de t". Para simplificar la notación llamaremos a v_m solamente v. Esta gráfica muestra cómo cambia la rapidez media del balín con el tiempo.

La primera información que se obtiene de la gráfica es que la rapidez inicial del balín es cero, es decir en $t = 0$ tics, $v = 0$ $^{cm}/_{tic}$.

Otra información importante es la forma en la que cambia la rapidez con el tiempo. ¿Cómo es este cambio?, ¿qué valor tiene el cambio de la rapidez entre el tiempo $t = 5$ y $t = 6$ tics?, y ¿entre $t = 8$ y $t = 9$ tics?, ¿qué puede decir de estos dos últimos resultados?

Seleccione un intervalo de tiempo cualquiera en esta gráfica, por ejemplo, el que va de $t_i = 4.5$ tic a $t_f = 10.5$ tic, se tiene que $t_f - t_i = \Delta t = 6.0$ tic. La rapidez correspondiente a cada tiempo es $v_i = 5$ $^{cm}/_{tic}$ y $v_f = 12$ $^{cm}/_{tic}$; de donde $v_f - v_i = \Delta v = 7$ $^{cm}/_{tic}$. La gráfica de la figura 1-41 muestra el cambio en la rapidez para el intervalo de tiempo considerado. Calcule ahora el cociente de Δv entre Δt.

Como seguramente ha notado, este cociente corresponde a la definición de aceleración media, y en la gráfica "v en función de t" ese cociente está directamente relacionado con la pendiente de la recta. Esto es, a mayor pendiente, mayor aceleración. El valor obtenido para la aceleración a la que

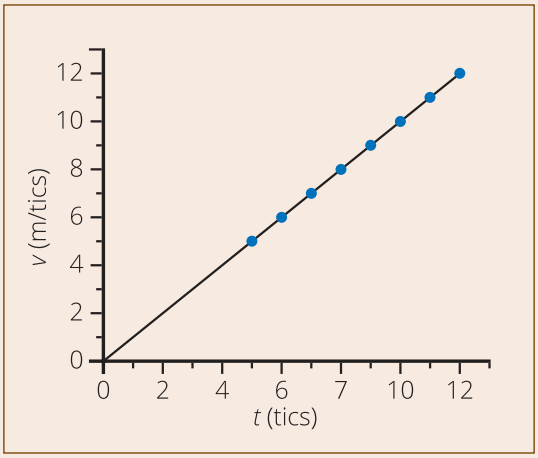


Figura 1-41.
Gráfica *v* vs. *t*.

cae el balín (1.16 $^{cm}/_{tic^2}$) puede expresarse en metros sobre segundo cuadrado; para ello bastará tener presente que un tic equivale a $^{1}/_{30}$ s, y hacer las sustituciones correspondientes. Hágalo y compare su resultado con el aceptado para la aceleración en caída libre de los cuerpos, que es de 9.8 $^{m}/_{s^2}$.

Actividad

Observe la siguiente gráfica "*v* en función de *t*" relativa a tres cuerpos en movimiento denominados A, B y C.
Conteste las siguientes preguntas:

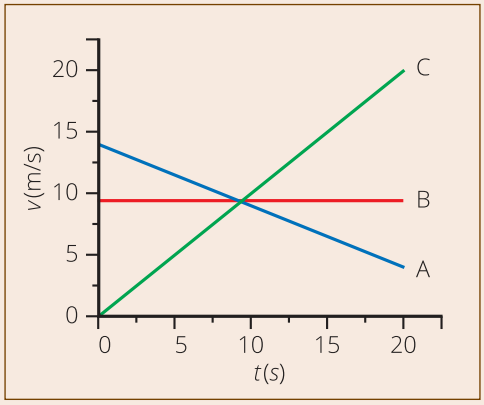


Figura 1-42.
Movimiento de los cuerpos A, B y C con 3 aceleraciones.

- ¿Qué tipo de movimiento tiene cada cuerpo?
- ¿Cuál es la velocidad inicial de cada uno de los cuerpos?
- ¿Qué ocurre cuando el tiempo vale $t = 8$ s?
- ¿Cuál de los cuerpos tiene mayor magnitud en su aceleración?
- ¿Qué signo tiene la aceleración en el caso del móvil *A*?

1.2 | La descripción de las fuerzas en el entorno

La fuerza, resultado de las interacciones por contacto (mecánicas) y a distancia (magnéticas y electrostáticas) y su representación con vectores

En el apartado anterior, se estudió el movimiento de algunos objetos. El que un objeto en particular cambie su estado de movimiento o de reposo es el resultado de la acción de uno o varios objetos sobre él.

Cuando un objeto actúa sobre otro para detener, iniciar o cambiar su movimiento, se dice que hay una *interacción* entre ambos objetos.

Actividad

1. Sostenga un libro en su mano y responda:
   - Con qué objetos interactúa el libro para estar en reposo, ¿qué siente su mano si el libro es grande, en comparación con uno pequeño?

2. Ponga ahora el libro en la mesa, ¿con qué objetos interactúa ahora el libro?

3. Describa las interacciones del libro cuando se pone sobre una cama elástica y cuando lo sitúa encima de un resorte.

4. Elabore una tabla como la siguiente y llene los espacios vacíos. Se han puesto dos ejemplos, en los que debe completar la tercera columna. Complete la tabla con otros diez objetos.

Objeto observado	En reposo o movimiento	Objeto u objetos causantes del reposo o del movimiento del objeto observado
Libro sobre su mano	Reposo	
Pelota de fútbol en el aire	Movimiento	

Interacciones por contacto

En un partido de fútbol el balón se mueve porque alguien lo ha golpeado, ya sea con el pie, con la cabeza o con las manos. En estos casos se dice que el balón se mueve por causa de una interacción de contacto entre el jugador y el balón. El pie, las manos o la cabeza del jugador son los que han entrado en contacto con la pelota, empujándola.

Figura 1-43. Fotografía de un balón deformado por un puntapié.

Al patear el balón, éste se deforma por el impacto del pie. Se tomó la foto de la figura 1-43 con una cámara fotográfica de alta velocidad para registrar el fenómeno.

Cuándo espera que se deforme más el balón: ¿si le da un puntapié un niño o un adulto? Si el balón llega al portero y éste lo atrapa, el balón detiene su movimiento, también mediante una interacción de contacto.

También podría suceder que la interacción del portero no resultara en el reposo del balón, sino en un cambio en la rapidez y en la dirección de su movimiento.

Interacciones a distancia

A las interacciones que no son de contacto visible entre los objetos se les llama interacciones a distancia.

Actividad

Frote un vaso o una regla de plástico en su pelo y acérquelo a un chorro de agua delgado. ¿Cambia la forma del chorro de agua? ¿De qué tipo es la interacción entre el vaso y el chorro de agua, de contacto o a distancia?

Coloque sobre una mesa pedacitos de papel y, como en el caso anterior, acerque a ellos el vaso o la regla frotados contra su pelo. ¿Qué sucede con los papelitos? ¿La interacción entre ellos es por contacto o a distancia?

En ambos casos, la interacción se llama *eléctrica*, porque el vaso o la regla se cargan eléctricamente al frotarlos contra el pelo, y por ello actúan sobre las cargas eléctricas del agua o de los papelitos, atrayéndolos.

A la interacción entre cualquier objeto y la Tierra se la denomina *gravitatoria* y es a distancia.

¿Ha observado que la Luna se mueve?, ¿con qué cree que interactúa? Si cree que existe una interacción, ¿de qué tipo sería?

Actividad

Tome ahora dos imanes de barra, únalos y márquelos con etiquetas rojas y azules como en la figura 1-44.

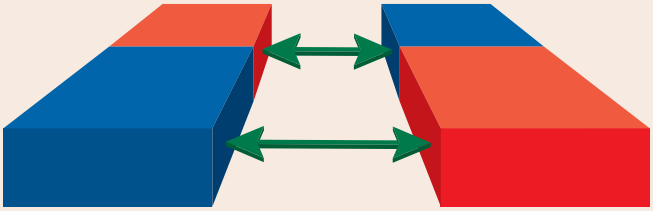


Figura 1-44. Imanes.

1. Ahora tome uno en cada mano.
   a) Acérquelos y aléjelos entre sí de modo que la marca roja de uno coincida con la azul del otro y observe, por la sensación en sus manos, el cambio en la intensidad de la interacción.
   b) Repita la operación girando uno de ellos de modo que la marca roja de uno coincida con la roja del otro.
   c) ¿Qué cambios nota en ambos casos?

2. Sitúe uno de los imanes sobre una mesa delgada de madera. Ahora coloque el otro imán por debajo de la mesa justo abajo del primero y muévalo de un lado a otro. ¿Qué sucede?

   A la interacción entre los dos imanes se llama *magnética*.

En la figura 1-45 se presentan algunos ejemplos de aplicación de fuerzas, donde una persona realiza las siguientes acciones: desliza una silla sobre el piso, empuja un pesado bloque, levanta una almohada y una pesada caja.

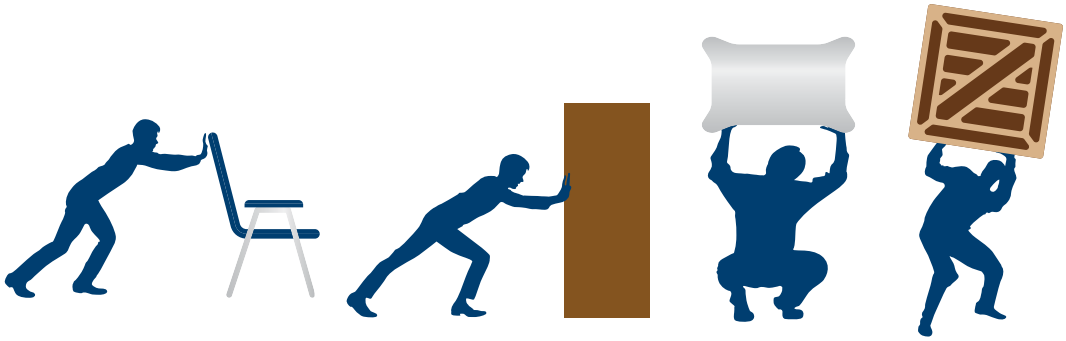


Figura 1-45. Acciones.

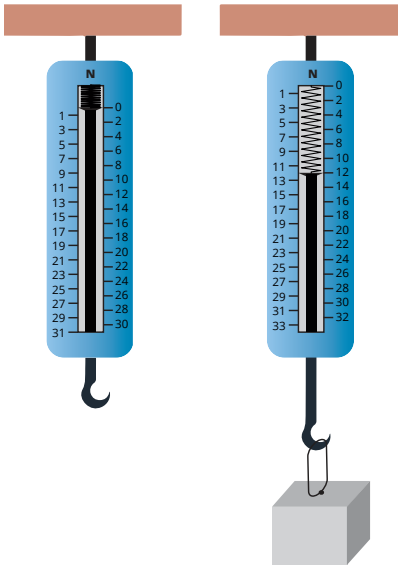


Figura 1-46. Dinamómetro con resorte.

Esta persona está aplicando una fuerza sobre cada una de los objetos descritos, la fuerza aplicada es, en cada caso, de diferente magnitud.

Ahora bien, la fuerza aplicada sobre un objeto es una magnitud física y por lo tanto se debe contar con una unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SIU). Así, como se ha visto, la unidad para medir el tiempo es el segundo (s); la empleada para medir longitud es el metro (m), la unidad para medir la fuerza es el newton (N).

El instrumento que se utiliza para medir fuerzas se llama dinamómetro.

En la figura 1-46 se presenta un dinamómetro, constituido por un resorte y una escala en newtons. Se utilizan los resortes como dinamómetros porque son cuerpos elásticos que modifican su tamaño de forma directamente proporcional con la magnitud de la fuerza aplicada, como se muestra en la figura.

En la figura 1-47, *x* es el cambio de longitud en el resorte, es decir, la cantidad en la que se ha incrementado su longitud al aplicarle una fuerza. Si se tienen dos resortes diferentes, se les aplica la misma fuerza a cada uno y se grafica la fuerza que marca el dinamómetro contra la longitud de elongación de cada uno, resulta que la pendiente de la recta roja es mayor que la de la azul. Esto indica que el resorte representado por la línea roja es más difícil de estirar que el correspondiente a la azul, es decir, es "más duro".

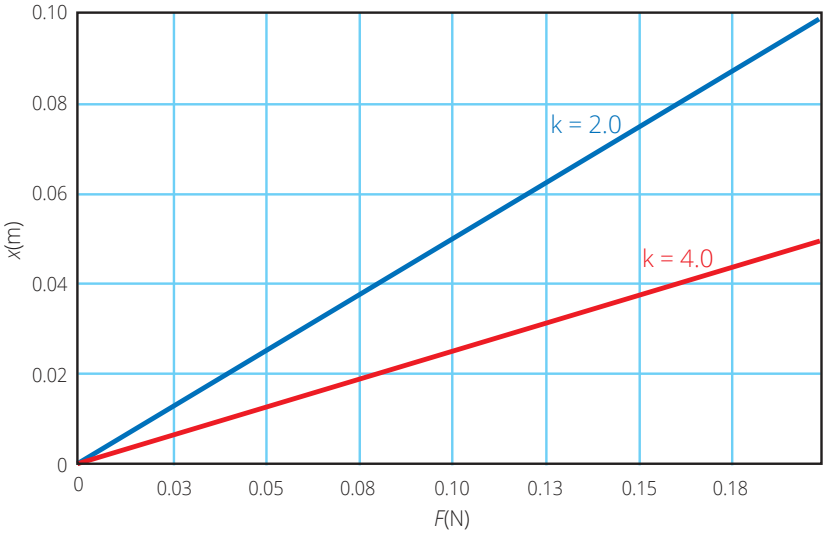


Figura 1-47. Gráfica *F* vs. *x* para dos resortes con diferente constante de elasticidad.

La fuerza de la atracción gravitacional de la Tierra sobre un objeto también se puede medir con un dinamómetro, es decir, se puede relacionar con la

elongación de un resorte. Si la masa del objeto es un kilogramo (la masa de un litro de agua), entonces a la elongación que presenta el dinamómetro, le llamaremos un "kilogramo-fuerza". Esta unidad de fuerza equivale a 9.8 newtons, porque la fuerza atractiva de la Tierra sobre la masa de un kilo es igual a esta masa multiplicada por la aceleración de la gravedad que es de 9.8 $^{m}/_{s^2}$.

La idea cotidiana de fuerza

Cuando empuja o jala un objeto:

- ¿De qué manera describiría la acción?
- ¿Cómo le llama a una persona que puede levantar grandes pesos, lanzar muy alto un objeto, empujar o jalar cuerpos muy pesados?
- ¿Ha notado que algunas personas pueden romper con facilidad un pedazo de madera, mientras que otras no?, ¿que alguien con poco esfuerzo comprime o estira un resorte, mientras que a otras personas se les dificulta?
- ¿Qué efectos puede ocasionar una fuerza aplicada por un objeto sobre otros objetos?

Actividad

Apriete diferentes objetos: plastilina, tela, un globo inflado, madera, un pedazo de hierro, etc. Describa el efecto que la fuerza aplicada por sus manos produce en esos objetos.

Se dice que una persona "tiene fuerza" cuando es capaz de cambiar a un cuerpo, ya sea en su estado de movimiento, o en su forma (estirándolo, comprimiéndolo, rompiéndolo, etc.), pero en física, la fuerza siempre es una interacción entre dos o más objetos. La fuerza no es "algo" que contenga un objeto, aunque éste sea un ser vivo. Si abraza a un compañero, a la fuerza que le aplica, se le llama *fuerza de acción*, y a la fuerza que su compañero ejerce sobre sus brazos, se le llama *fuerza de reacción*.

La fuerza de acción y su reacción van siempre juntas, aunque se aplican en objetos distintos, que son los que interactúan (figura 1-48).

Actividad

Enliste las fuerzas de acción y reacción en los casos siguientes: libro sobre su mano, libro sobre una mesa, libro sobre el suelo, un balón al patearlo.

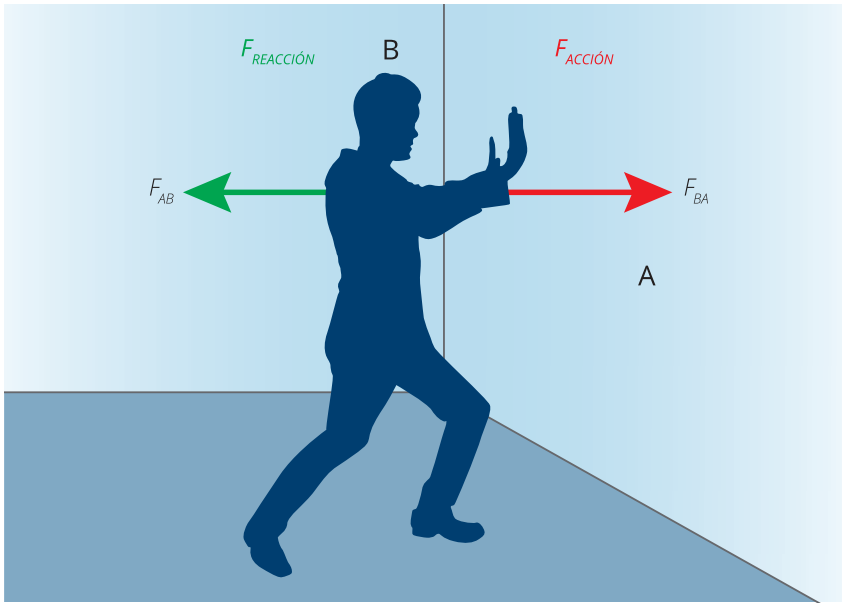


Figura 1-48.
Acción y reacción.

En general, si se tienen dos cuerpos *A* y *B* interactuando, a la fuerza que ejerce *A* sobre *B*, se le puede llamar indistintamente "fuerza de acción" o "fuerza de reacción". Ambas fuerzas vienen siempre en pares.

Si levanta un libro del suelo está aplicando una fuerza sobre él, con la aplicación de la fuerza de su mano sobre el libro ha logrado cambiarle su posición, desde el suelo hasta una cierta altura, es decir, de una situación de reposo, a otra también de reposo. ¿Qué fuerzas ha tenido que vencer para conseguir el cambio de altura del libro?

Otro caso sería aplicar una fuerza para mover un objeto. Si al empujar una caja pesada logra que ésta se mueva, ¿qué fuerza, o fuerzas ha tenido que vencer?

Actividad

La aplicación de una fuerza de contacto por un objeto sobre otro puede también ocasionar que éste cambie de forma, o de tamaño. ¿Qué otros efectos puede reconocer cuando un objeto ejerce una fuerza sobre el otro?

¿Qué efectos se ocasionan sobre el objeto que aplica la fuerza?, es decir, ¿qué efectos tiene la fuerza de reacción que el otro objeto ejerce sobre el primero? Explique esto con algunos ejemplos.

El concepto de fuerza: el resultado de las interacciones

En la sección anterior se ha explicado que la aplicación de una fuerza a un objeto le ocasiona lo siguiente:

1. Lo cambia de un lugar a otro, como cuando traslada un libro de la silla a la mesa.
2. Le cambia la velocidad, como cuando el portero, en uno de los ejemplos, le pega al balón que se le aproxima.
3. Le cambia la forma, por ejemplo al estirar o comprimir un resorte.

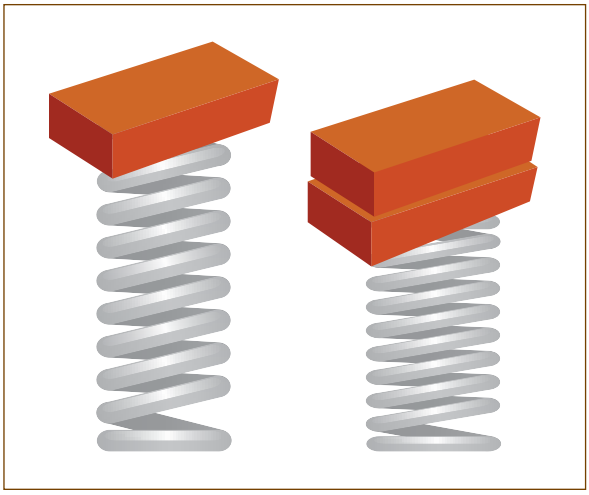


Figura 1-49. Dos imágenes: resorte con un tabique encima y resorte con dos tabiques encima.

Un ejemplo ilustrativo del caso *c*) se muestra en la figura siguiente. Un resorte se comprime al poner encima de él un objeto pesado, y se comprime el doble al ponerle encima otro objeto más, del mismo peso que el anterior.

En los dos casos, al quitar los tabiques el resorte recupera su longitud inicial. Cuando esto sucede, se dice que el objeto es *elástico*.

Al poner el tabique encima del resorte, éste se comprime por la acción del peso. El peso resulta de la acción de la atracción de la Tierra sobre el tabique.

A la fuerza de acción sobre un objeto deformable se le llama *esfuerzo*, y al cambio de forma que produce se le llama *deformación*.

Imagine que tiene una liga y un pedazo de plastilina. A ambos le aplica un esfuerzo, ¿cuál de ellos recupera su forma al dejar de aplicarlo? Notará que la liga es la que recupera su forma. Se dice entonces que la liga es *elástica*, mientras que la plastilina es *inelástica*.

Actividad

Llene una lata de refresco de 355 ml con agua. Vacíe el agua en un recipiente transparente y marque el nivel con un plumón. A continuación divida esta marca en cuatro partes iguales. Cuelgue ahora la lata vacía usando una liga y mida su longitud. Vierta el agua del recipiente en la lata hasta la primera marca y registre la nueva longitud de la liga. Repita este procedimiento con las tres marcas restantes. Grafique en un plano cartesiano la longitud de la liga contra las medidas de agua (0, ¼, ½, ¾, 1). ¿Qué tipo de gráfica obtiene? Notará que la deformación es proporcional al esfuerzo.

¿Qué pasaría si este experimento lo realiza con plastilina, en vez de la liga?

Como se mencionó, un objeto cambia de un estado de reposo o de movimiento a otro, cuando se aplica una fuerza sobre él.

Tanto el estado de reposo como el de movimiento son siempre en relación con un *marco* o *sistema de referencia*. Éste sirve para identificar las posiciones de los objetos y sus cambios, es decir, permite cuantificar su movimiento.

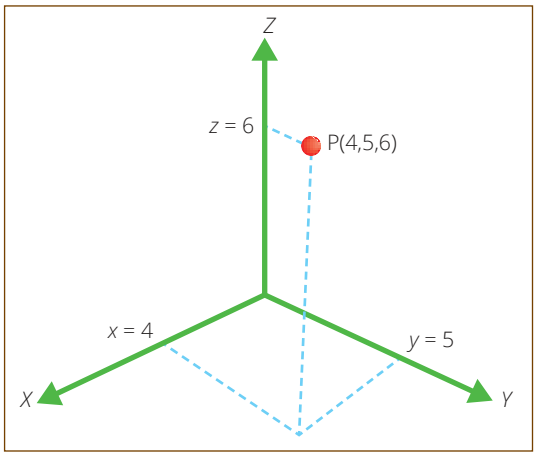


Figura 1-50. Marco de referencia cartesiano y especificación de un punto P mediante la terna de números *x*, *y*, *z*.

El marco cartesiano de referencia tridimensional consiste en tres líneas mutuamente perpendiculares, como se indica en la figura 1-50.

Entonces, la localización de cada punto en el espacio de tres dimensiones requiere de tres números: *x*, *y*, *z*. Cada uno de ellos es la distancia perpendicular, medida en metros, a cada uno de los ejes designados por *X*, *Y*, *Z*. La localización del punto *P* se designa como *P*(*x*, *y*, *z*).

Actividad

Fabrique un sistema cartesiano de referencia portátil pegando tres popotes, de modo que se unan perpendicularmente en un punto, el cual será el origen. Cada popote es un eje cartesiano. Los tres ejes pueden designarse por las letras *X*, *Y*, *Z*. El sistema puede viajar con usted a cualquier parte y hacerlo coincidir con alguna referencia.

Ubique el origen del marco cartesiano de referencia en una de las esquinas que forman dos paredes con el piso de su salón. Los ejes *X*, *Y*, *Z* son las tres líneas mutuamente perpendiculares que corren a lo largo de las intersecciones de cada par de planos, como en la figura 1-51.

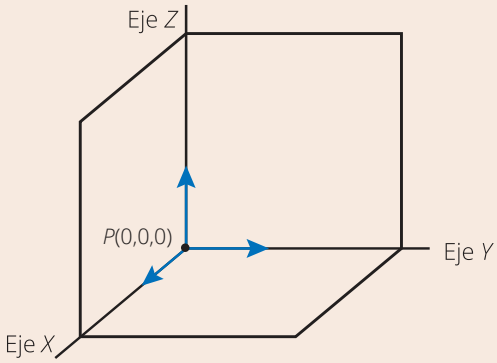


Figura 1-51. Marco cartesiano de referencia en un cuarto.

El origen queda representado por el punto *P*(0, 0, 0).

Provisto de una cinta métrica dé las coordenadas de varios objetos en el salón.

Si afirma que un objeto, por ejemplo, una silla del salón, está en reposo, significa que su posición no cambia en el tiempo con respecto al origen. Siempre la verá en el mismo lugar.

Pero si usted mueve el sistema cartesiano de referencia portátil, ¿cómo cambia el estado de movimiento de la silla? Ya no la ve quieta. En este caso, simplemente, por ver a la silla desde un marco de referencia en movimiento, su estado de reposo ha cambiado, *pero no porque se le haya aplicado una fuerza*, sino debido a que el sistema de referencia se mueve.

Actividad

Llevando con usted el marco de referencia que construyó, haga una lista de algunos objetos de su alrededor que estén en estado de reposo y en estado de movimiento, con respecto a usted. Es decir, ahora usted es el marco o sistema de referencia.

De aquí en adelante, se estudiará el movimiento de los objetos respecto a un sistema de referencia fijo con respecto al suelo.

Los cambios en el estado de movimiento del objeto, con respecto a un sistema fijo de referencia, se entenderán como cambios en su estado de reposo o en su estado de velocidad inicialmente constante. Es decir, se trata de cambios de velocidad que, como ya sabemos, indican una aceleración.

Estos cambios, que derivan en la aceleración de un objeto, serán adjudicados a la acción de fuerzas interactuantes con otros objetos.

Recuerde el caso del libro en su mano. Inicialmente el libro está en reposo con respecto a usted, o en relación con el suelo. Pero si quita su mano, el libro cambiará de estado de movimiento, acelerándose hacia el suelo en sentido perpendicular a éste.

El libro estaba originalmente en reposo porque dos fuerzas contrapuestas e iguales actuaban sobre él: por un lado, la fuerza de la atracción de la Tierra y, por otro, la fuerza de su mano deteniéndolo, es decir actuando en sentido contrario. No hay ninguna *fuerza neta* o *efectiva* que quede desbalanceada.

Si quita su mano, queda sin compensar la fuerza de atracción de la Tierra y, por esto, el libro cambia su estado del reposo a uno con aceleración constante.

Cuando se afirma que una fuerza aplicada sobre un objeto le ocasiona cambios en su velocidad, se quiere decir que esta fuerza actuando sobre el cuerpo no está balanceada, es decir existe una fuerza neta.

Observe que cuando la fuerza neta sobre un objeto es cero, éste puede tener un movimiento a velocidad constante, o quedar en reposo.

En el ejemplo de la caída del filtro de café, ¿por qué éste cae con velocidad constante? ¿cuáles son las fuerzas que actúan sobre él, de modo que la fuerza neta es cero?

Note que, si la fuerza resultante sobre un objeto es cero, entonces éste está en reposo (como el libro en la mano) o se mueve a velocidad constante (como el filtro del café)

Fuerza resultante, métodos gráficos de suma vectorial

Para poder representar a la fuerza con una gráfica, considere el caso en que empuja un objeto: la fuerza puede ser grande o pequeña, si lo quiere aventar lejos o cerca; es decir, la fuerza tiene un cierto tamaño. Pero también la fuerza tiene

dirección, porque usted empuja el objeto en alguna dirección. En el apartado anterior se mencionó que la dirección de la fuerza puede tener dos sentidos. Ahora, en el ejemplo, está aplicando fuerzas en la misma dirección, pero en sentidos opuestos según jale o empuje al objeto.

En este ejemplo, la dirección y el sentido de la fuerza aplicada sobre el objeto coinciden con la dirección y sentido de su movimiento. Pero se analizarán situaciones en que éstas no coinciden. Como se mencionó, a algo que tiene tamaño o magnitud, dirección y sentido, se le llama vector, y se le representa gráficamente mediante una flecha con longitud, dirección y sentido. Así que la fuerza con que empuja al objeto la podría representar mediante un vector, como se muestra en la figura 1-52.

Suponga dos fuerzas colineales, es decir, dos fuerzas que actúan sobre un objeto en una dirección, pero una de ellas está aplicada en un sentido y la otra en sentido contrario.

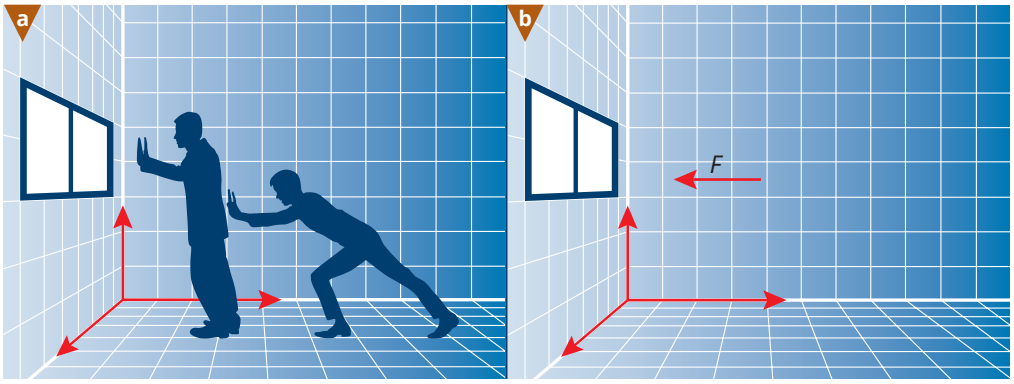


Figura 1-52.
a) Una persona empuja a su compañero hacia la ventana;
b) esquema de la fuerza, aplicada sobre el compañero, dirigida hacia la ventana.

Actividad

1. Represente gráficamente las dos fuerzas que actúan sobre el libro que reposa en su mano, de modo que la fuerza neta o resultante sea cero.
2. Haga lo mismo con las dos fuerzas que actúan sobre el filtro del café, cuando va cayendo a velocidad constante.

Actividad

Si dos personas, empujan al mismo tiempo, hacia la ventana un objeto, éste se verá sometido a dos fuerzas ($\vec{f}_1$ y $\vec{f}_2$), de magnitudes diferentes pero actuando en la misma dirección y sentido. El efecto combinado de ambas fuerzas es una resultante de magnitud ($\vec{f}_1$ y $\vec{f}_2$). Por ejemplo, si una persona empuja con fuerza $\vec{f}$ y otra con una fuerza $2\vec{f}$, siempre hacia la ventana, la fuerza neta será $\vec{f} + 2\vec{f} = 3\vec{f}$ en esa dirección y sentido.

Pero ¿qué sucede cuando una persona empuja un objeto con una fuerza $\vec{f}$ hacia una ventana y el otro lo empuja con una fuerza igual, pero en sentido contrario?

El procedimiento geométrico para sumar vectores consiste en situar una flecha a continuación de la otra, de manera que en la punta de la primera se sitúe el inicio de la siguiente, manteniendo la magnitud, dirección y sentido de cada vector, hasta terminar con los que quiera sumar. El resultado de la suma será la flecha que una el inicio de la primera con la punta de la última (figura 1-53).

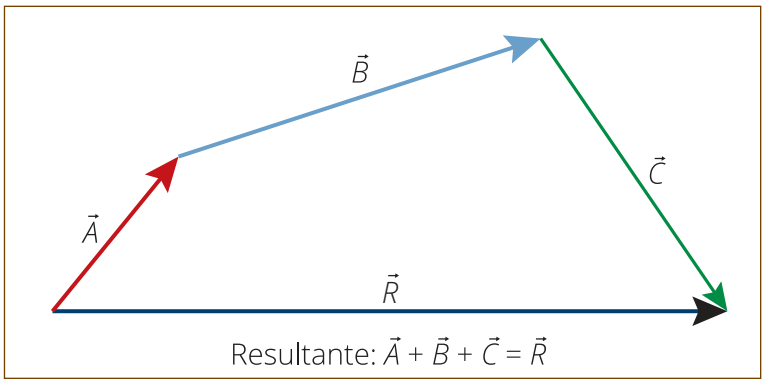


Figura 1-53. Suma de varios vectores.

Actividad

Empuje un objeto hacia un punto, mientras que otra persona lo hace en sentido perpendicular, ¿hacia dónde se moverá el objeto? Dibuje la situación representando las fuerzas gráficamente. ¿Hacia dónde apunta la flecha de la fuerza resultante? ¿Coincide con la dirección y sentido en que se desplazó el objeto?

Para restar dos vectores, se sigue el procedimiento de la suma, pero cambiando el sentido al vector que quiere restar, como en la figura 1-54.

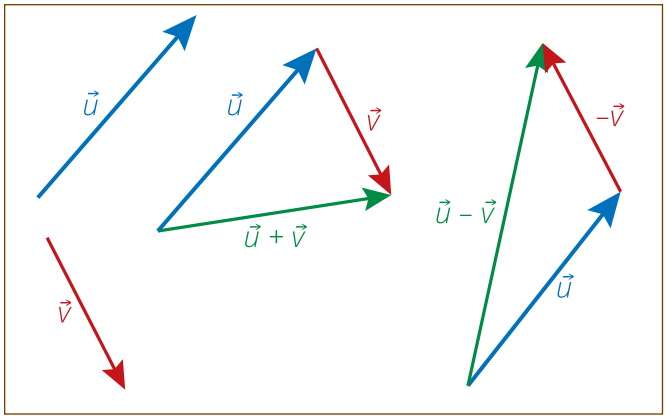


Figura 1-54. Resta de fuerzas.

La relación entre los vectores que representan al desplazamiento y a la fuerza neta aplicada sobre un objeto es un tema básico de la mecánica.

Actividad

Marque con un gis en el suelo su posición inicial. A partir de este origen, dibuje dos líneas rectas perpendiculares, una en la dirección sur-norte y otra en la dirección oeste-este. Marque con el gis puntos sobre las líneas, separados a un paso de distancia cada uno, y numérelos a partir del origen. Tome en cuenta que los números a la izquierda del origen sobre la línea oeste-este son negativos, así como los que quedan del origen hacia "abajo", sobre la línea sur-norte.

Represente gráficamente en cada caso el desplazamiento neto resultante y escriba las coordenadas del punto correspondiente a la punta de la flecha del desplazamiento neto:

1. Párese en el origen (0, 0) y camine tres pasos al norte, luego tres pasos al sur. Sume vectorialmente los desplazamientos, ¿en qué punto termina?
2. A partir del origen camine tres pasos al norte y luego tres pasos al este. ¿En qué punto $P(x, y)$ queda la punta de la flecha del desplazamiento resultante?
3. A partir del origen camine tres pasos al norte y en seguida cuatro pasos al este. ¿En qué punto $P(x, y)$ queda la punta de la flecha del desplazamiento resultante?
4. A partir del origen camine dos pasos hacia el este y después tres pasos hacia el sur. Sume vectorialmente los dos desplazamientos y dé las coordenadas del punto de la flecha del desplazamiento neto.
5. A partir de donde se quedó en el ejercicio 4, desplácese ahora cuatro pasos hacia el oeste y, enseguida, dos pasos hacia el sur.
6. A partir del origen desplácese ahora cuatro pasos hacia el oeste y, enseguida, dos pasos hacia el sur. Compare los desplazamientos resultantes de este ejercicio y el anterior, ¿qué tienen en común?

Observe que cada desplazamiento resultante tiene magnitud, que es la distancia neta recorrida, dirección y sentido. Determine la magnitud y dirección en cada caso de la actividad. Para determinar la dirección, coloque un transportador sobre el inicio del vector resultante, y mida el ángulo con respecto al eje X.

Una vez obtenido el desplazamiento resultante, observe que siempre lo puede representar como la suma de dos vectores: uno sobre el eje X y otro sobre el eje Y del plano cartesiano. Esto es cierto para cualquier vector.

Regresando al concepto de fuerza. Se dijo que es un vector, como también lo es el desplazamiento, sólo que ambos son magnitudes físicas de naturaleza diferente. ¿Qué unidades tendrán las divisiones de los ejes si se quiere representar una fuerza? Recordemos que la unidad de fuerza es el *newton*, en el Sistema Internacional de Unidades.

Equilibrio de fuerzas: uso de diagramas

Ahora imagine que aplica a un objeto, situado en el origen, una fuerza de tres newtons hacia el norte, y simultáneamente una fuerza de tres newtons hacia el sur. ¿Está de acuerdo en que la fuerza resultante es 0 newtons?

Actividad

En un espacio cartesiano, de dos dimensiones, represente los procesos siguientes, con los que ya está familiarizado:

1. Si un niño empuja a otro con una fuerza de 3 newtons en un sentido y, al mismo tiempo, otro lo empuja perpendicularmente con una fuerza de 4 newtons, ¿cuál es la dirección y magnitud (en newtons) de la fuerza resultante?
2. Dibuje las fuerzas que actúan sobre un filtro de café.
   a) Antes de moverse con velocidad constante, ¿qué fuerza tiene mayor magnitud: la fuerza de fricción del aire sobre el filtro o el peso de éste?
   b) Cuando se mueve con velocidad constante, ¿de qué tamaño comparativo son las fuerzas de fricción del aire sobre el filtro y el peso del filtro?
   c) Si se le sopla hacia arriba, una vez que alcanzó una velocidad de caída constante, ¿hacia dónde apunta la fuerza resultante?

Se estudiará la conexión entre la dirección y sentido de la fuerza neta aplicada y la dirección y sentido del desplazamiento provocado.

Actividad

Analice los siguientes casos y compruebe si el desplazamiento y la fuerza coinciden en dirección y sentido:

La caída de una piedra al dejarla caer de la mano: dibuje en el espacio cartesiano (x, y), donde x es el eje horizontal y y el eje vertical, el despla-

zamiento de la piedra cuando se deja caer de una altura de 1 m, es decir, del punto (0, 1), si el origen (0, 0) está en el suelo.

Haga otro esquema para representar las fuerzas, ahora en un espacio cartesiano (F_x, F_y). En este espacio represente la fuerza con la que se empuja o empujan a una persona, al mismo tiempo. Note, en estas circunstancias, que la persona, para tratar de permanecer en posición vertical, trata de desplazarse en el sentido de la fuerza resultante. ¿Qué le pasaría si se aferrara al suelo, oponiendo resistencia al desplazamiento en sentido de la fuerza neta que se le aplica?

Lanzamiento de una piedra. Dibuje el vector de desplazamiento de la piedra en el espacio cartesiano (x, y) y, en el espacio de las fuerzas, dibuje nuevamente las fuerzas que actúan sobre ella.

¿Qué conclusiones obtiene respecto a la dirección de los desplazamientos y de las fuerzas netas en todos los casos anteriores? Observe que, en algunos casos, la dirección del vector de desplazamiento y la del vector de la fuerza neta no coinciden.

2 | Leyes del movimiento
La explicación del movimiento en el entorno

Primera ley de Newton: el estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme

La inercia y su relación con la masa

Cuando se estudia el movimiento de los objetos sobre la superficie de la Tierra, se encuentra que existe una fuerza que siempre se opone a su movimiento, la que depende de las características de las superficies en contacto; a esta fuerza la conocemos como *fuerza de fricción*.

Existen dos tipos de fuerzas de fricción: la *estática* y la *dinámica*. La primera es la fuerza que se opone a que se inicie el movimiento de un cuerpo sobre una superficie. Cuando el objeto ya está en movimiento, se presenta una fuerza de fricción entre las superficies (el piso y la base del objeto) que se denomina fricción dinámica, que impide que el cuerpo se desplace indefinidamente.

Así, la fricción entre nuestros zapatos y el suelo es la responsable de que se pueda avanzar al caminar; si no hubiera fricción, como en el caso de caminar sobre el hielo, donde no es fácil hacerlo, los zapatos resbalarían. Un auto tampoco podría avanzar en hielo o en una superficie cubierta de aceite, pues al no haber fricción entre las llantas y la superficie, ellas solamente girarían sin tener apoyo.

Considere el caso en que empuja una caja de cartón pesada que está sobre el suelo; notará que existe una fuerza que le dificulta moverla. Esa fuerza es la llamada fuerza de fricción, la cual se opone siempre al movimiento. La caja se empieza a mover en el momento en que la fuerza ejercida sobre ella supera a la de fricción.

Viendo con detenimiento las fuerzas que actúan sobre una caja a la que se le dio un impulso, se observa que inicialmente se desliza en el suelo y eventualmente se detiene, lo que quiere decir que sobre la caja se están aplicando las siguientes fuerzas: la fuerza gravitacional de la Tierra $(\vec{F}_{T/c})$; la fuerza que ejerce el piso sobre el cuerpo $(\vec{F}_{p/c})$ y la fuerza de fricción entre la superficie inferior de la caja y el piso (F_F).

Como se puede ver en la figura 2-1, la fuerza gravitacional de la Tierra $\vec{F}_{T/c}$ y la fuerza que ejerce el piso sobre el cuerpo $\vec{F}_{p/c}$ son ambas verticales, de sentidos opuestos y de igual magnitud, por lo que se anulan. Así que, en este caso, la única fuerza no balanceada, es decir, la *fuerza neta*, es la fricción, la cual actúa oponiéndose al movimiento de la caja. Debido a esta fuerza, la velocidad de la

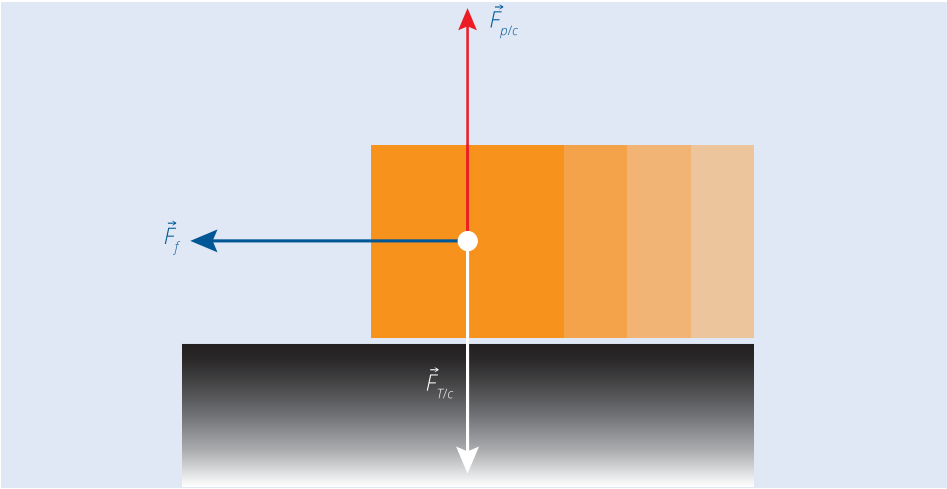


Figura 2-1.
Diagrama de fuerzas.

caja se hace cada vez menor hasta que, finalmente, se detiene, ¿qué sucede si se disminuye la fuerza de fricción, poniéndole ruedas a la caja o lubricando el piso? La caja tardará más en detenerse y, en consecuencia, recorrerá una distancia mayor. Si se logra eliminar totalmente el rozamiento, es decir, si no hay fuerza de fricción que se oponga al movimiento, no existiría ninguna razón para que la velocidad disminuya; entonces la caja seguiría moviéndose indefinidamente en la misma dirección y con la misma velocidad inicial.

Si una piedra se mueve en el aire, ésta presenta resistencia al movimiento. Si la piedra se mueve en un sentido, la fuerza de fricción por acción del aire apunta en sentido contrario. Además, la fuerza de fricción del aire sobre ella aumenta con la rapidez con la que se mueve.

¿Se imagina de qué otra característica del objeto depende la fuerza de fricción? Recuerde la caída de una hoja de papel extendida y una hecha bola. En ese caso, la fuerza de fricción es proporcional al área de la superficie de contacto con el aire, siempre en el sentido contrario al movimiento.

Cuando un cuerpo cae en el aire, su rapidez crece, pero como la fricción aumenta con la rapidez, llega un momento en que la magnitud de la fuerza de fricción se iguala con la magnitud de la fuerza de atracción de la Tierra. Como ambas fuerzas, la de fricción y el peso, son de sentido contrario, la fuerza neta sobre el cuerpo es cero, de modo que éste caerá con velocidad constante. A esta velocidad se le llama *velocidad terminal*.

Dado que en la Luna no hay atmósfera, ¿cree que un objeto que cae sobre su superficie puede alcanzar una velocidad terminal?

Regresando al ejemplo de la caja, si la fuerza que le aplica es mayor que la fuerza de fricción del suelo, se producirá un movimiento acelerado. Cuando la fuerza aplicada se iguala a la fuerza de fricción, entonces el movimiento es a velocidad constante.

Ahora imagine el experimento con el suelo recubierto de aceite. Bastará un pequeño empujón para poner en movimiento a la caja en el sentido de la fuerza aplicada. Y no se detendrá hasta que choque con algún obstáculo, o hasta que el

aceite se termine y el suelo actúe nuevamente con una fuerza de fricción de tal magnitud que la frene.

Para mostrar los efectos de la fricción, los físicos han inventado una mesa con un gran número de orificios, de los cuales sale aire inyectado por una bomba. A ésta se le llama *mesa de aire*. Una experiencia más elaborada que la anterior se puede realizar colocando un disco sobre su superficie (figura 2-2). El aire que sale por los orificios lo mantiene suspendido. El disco entonces se puede mover prácticamente sin fricción sobre la superficie de la mesa. Se observa que el más pequeño impacto es capaz de producir un movimiento en el disco, el cual se mueve en línea recta sin que su velocidad disminuya y sólo cambiará por el impacto con las paredes.

¿Qué hace que el disco se mueva continuamente, después de darle un empujón? El empujón corresponde a aplicarle una fuerza durante un instante, pasado el cual ya no existe fuerza actuando sobre él, por lo que continuará moviéndose con la velocidad que el empujón le proporcionó.

Si la mesa fuera muy larga y muy ancha, el disco, después de un empujón, se movería en línea recta sin detenerse.

Recuerde lo que decían Aristóteles y Galileo en relación con la fuerza y el movimiento. Analícelo de acuerdo con el ejemplo del disco moviéndose sobre la mesa de aire.

En resumen, cuando la fuerza neta sobre un objeto es cero, su velocidad es cero o se mantiene constante en magnitud y dirección; y lo inverso también es válido, si un cuerpo se mantiene en reposo o se mueve con velocidad constante, entonces se puede decir que la fuerza neta sobre él es cero.

Este resultado fue formulado por primera vez por René Descartes, y es el que establece Newton en su primera ley, o principio de inercia.

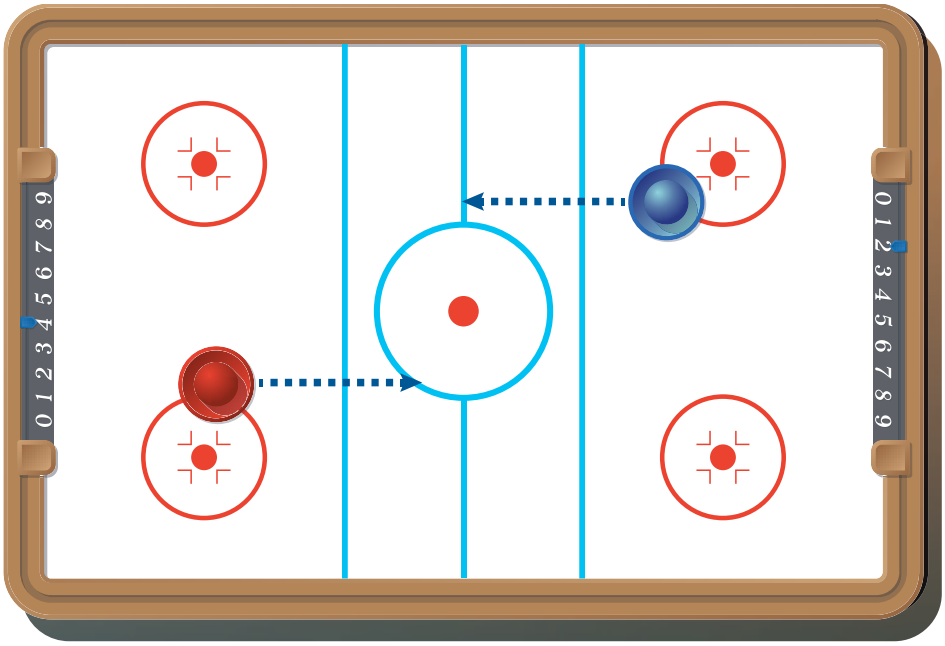


Figura 2-2. Mesa de aire con disco.

Segunda ley de Newton: relación fuerza, masa y aceleración

El newton como unidad de fuerza

Con lo estudiado hasta ahora se sabe que cuando sobre un objeto actúa una fuerza neta diferente de cero, entonces la velocidad del objeto cambia; el cambio puede ser aumento o disminución en su magnitud, en su dirección o en ambas. Se puede decir también que todo cambio en la velocidad de un objeto es debido a la acción de una fuerza no balanceada que actuó sobre él.

En la segunda mitad del siglo XVII Isaac Newton analizó esta relación entre fuerza neta y cambio de velocidad, lo que lo condujo a plasmarlo en las Leyes del movimiento, las cuales son la base de su magna obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada en 1687. Newton fue, ciertamente, un gran científico, para algunos el más grande de la historia. Se dice que declaró: *"Si he visto lo que muchos otros no han podido ver, es porque he estado montado en hombros de gigantes"*; se considera que esta declaración es un reconocimiento a que sus trabajos e investigaciones tuvieron como base los aportes de algunos sabios que lo precedieron, como Galileo Galilei, Johannes Kepler y Tycho Brahe. Newton supo de los experimentos de Galileo y de las reflexiones de Descartes sobre la inercia (la tendencia de los objetos a conservar su estado de movimiento rectilíneo o de reposo).

Newton observó que la inercia de los objetos dependía directamente de su masa; los objetos muy masivos presentan una inercia muy grande, es decir, una gran tendencia a conservar su estado de movimiento rectilíneo uniforme o de reposo. Esto lo llevó a razonar que la aceleración que experimenta un objeto depende tanto de la fuerza neta aplicada como de su masa. Realizando experimentos encontró que el cambio en la velocidad de un objeto varía de manera inversa con la masa. Es decir:

$$\Delta v \propto \frac{1}{m}$$

Esto es, cuando la masa aumenta, el cambio en velocidad disminuye. Además, que éste varía directamente con la fuerza neta aplicada.

$$\Delta v \propto F_{\text{neta}}$$

De estas dos relaciones de proporcionalidad, concluyó que:

$$\Delta v \propto \frac{F_{\text{neta}}}{m}$$

De esta expresión se desprende que si se fija el valor de la fuerza neta, entonces el cambio de velocidad varía de manera inversa con la masa; si ahora se fija la

masa y se varía la fuerza neta, entonces el cambio en la velocidad varía directamente con ésta.

Ahora bien, se sabe que mientras esté actuando la fuerza neta sobre el objeto, la velocidad de éste estará cambiando; por lo tanto, el cambio total que experimente la velocidad tendrá que ser grande, si el intervalo de tiempo durante el cual actúa la fuerza es grande. Esto es, Δv varía de manera directa con el intervalo de tiempo Δt, es decir:

$$\Delta v \propto \Delta t$$

Se pueden reunir las dos relaciones de proporcionalidad anteriores en una sola:

$$\Delta v \propto \frac{F_{\text{neta}}}{m} \Delta t$$

Esta relación nos dice que el cambio de velocidad de un objeto varía de manera directa tanto con la fuerza neta aplicada como con el intervalo de tiempo durante el cual dicha fuerza se aplica, y de manera inversa con la masa del objeto.

Si se multiplica ambos lados por m:

$$m\Delta v \propto F_{\text{neta}} \Delta t$$

Llamando k a la constante de proporcionalidad:

$$m\Delta v = k\ F_{\text{neta}} \Delta t$$

En el Sistema Internacional de Unidades $k = 1$, y por lo tanto:

$$m\Delta v = F_{\text{neta}} \Delta t$$

Esta ecuación es muy parecida a la que usó Newton para relacionar la fuerza neta que actúa sobre un objeto con el cambio en su estado de movimiento y permite cuantificar el cambio en velocidad que experimenta un objeto de masa m al aplicarle una fuerza neta conocida durante el intervalo de tiempo Δt.

Se sabe que todo cambio en la velocidad implica la existencia de una aceleración. Si se utiliza este concepto se puede obtener una expresión que relaciona la *fuerza neta* con la aceleración, dividiendo la ecuación anterior entre Δt, queda:

$$\frac{m\Delta v}{\Delta t} = F_{\text{neta}}$$

En esta ecuación aparece el cociente del cambio de velocidad Δv, entre el intervalo de tiempo que dura ese cambio, Δt. Como se sabe, $\Delta v / \Delta t$ es la aceleración del objeto en ese intervalo de tiempo, así:

$$F_{\text{neta}} = ma$$

La ecuación anterior es la representación más conocida de la llamada *segunda ley de Newton*. En el SIU, tenemos que: *m* se mide en kilogramos (kg), *a* se mide en metros sobre segundo al cuadrado (m/s^2), y F_{neta} se mide en newtons (N), donde 1N = 1 kg m/s^2. Así, se puede decir que un newton es la fuerza que, aplicada a un objeto cuya masa es de 1 kg, le produce una aceleración de 1 m/s^2.

Tercera ley de Newton: la acción y la reacción; magnitud y sentido de las fuerzas

Finalmente, la *tercera ley de Newton* habla de la interacción entre pares de cuerpos. Como se mencionó, si un cuerpo *A* ejerce una fuerza sobre un cuerpo *B*, entonces el cuerpo *B* ejerce simultáneamente una fuerza sobre el cuerpo *A*. Se ha convenido en llamar a una de ellas *fuerza de acción*, y a la otra, *fuerza de reacción*. Esta ley dice que la fuerza que ejerce el cuerpo *A* sobre el cuerpo *B* es de igual magnitud que la que ejerce *B* sobre *A* y que además son de sentidos opuestos:

$$F_{A/B} = -F_{B/A}$$

Si se tiene un par de *fuerzas* $F_{d/g}$ y $F_{g/d}$ como las que se muestran en la figura 2-3, se puede obtener lo siguiente:

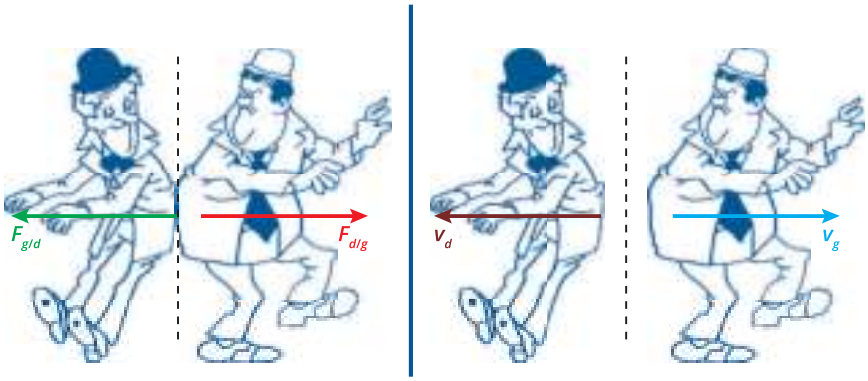


Figura 2-3.
Par de fuerzas.

- Forman un par de fuerzas.
- Se presentan de forma simultánea.
- Actúan sobre cuerpos diferentes.
- A una la llamamos *fuerza de acción*, y a la otra *fuerza de reacción*.

Pero la figura arroja más información:

$F_{d/g}$ y $F_{g/d}$ actúan en sentidos opuestos.

Otra característica, que no es tan evidente, de este par de fuerzas es que:

$$\text{magnitud de } F_{d/g} = \text{magnitud de } F_{g/d}.$$

Esto es, que ambas fuerzas son de igual tamaño.

Ciertamente, esta afirmación puede parecer errónea, pues la situación hace creer que actuó una fuerza de mayor magnitud sobre uno de ellos; pero no es así, $F_{d/g}$ y $F_{g/d}$ son de igual magnitud, sólo que la aceleración a_d es mayor que la aceleración a_g, ya que las masas son distintas.

Las *tres leyes de Newton*, junto con la *ley de la gravitación universal*, que se abordará más adelante, forman el gran aporte de Isaac Newton al entendimiento de la relación entre las fuerzas y el movimiento de los cuerpos, conocido como la *mecánica newtoniana*. Esta teoría explica tanto el movimiento de los objetos sobre la superficie terrestre, como el movimiento de los cuerpos celestes en el sistema solar. La *mecánica newtoniana* ha permitido diseñar y desarrollar una gran variedad de dispositivos mecánicos y grandes construcciones. También ha hecho posible los vuelos en órbitas terrestres y aún más, los exitosos viajes a la Luna y el lanzamiento de las cápsulas espaciales que descendieron sobre la superficie de Marte.

Efectos de las fuerzas en la Tierra y en el universo

Gravitación. Representación gráfica de la atracción gravitacional. Relación con caída libre y peso

Fue Newton a quien se le ocurrió relacionar el movimiento de los cuerpos que caen verticalmente a la superficie de la Tierra con el movimiento circular de la Luna en torno a ella. Este genial razonamiento llevó a Newton a realizar cálculos basados en experimentos anteriores, que culminaron en descubrir que ambos eran movimientos acelerados y que la causa de esta aceleración era la atracción gravitatoria dirigida hacia el centro de la Tierra.

Es claro que los movimientos son diferentes. Ello se debe a que las condiciones iniciales no son las mismas; la Luna tuvo alguna vez una velocidad inicial tangencial que la hizo tener una órbita, a diferencia del cuerpo que cae verticalmente hacia la Tierra. En ambos casos se trata de trayectorias determinadas por una fuerza dirigida hacia el centro de la Tierra.

El sentido común dice que al lanzar un cuerpo hacia arriba, llegará a una cierta altura y después caerá; si se lanza con más velocidad, llegará más alto y tardará más en caer. ¿Qué ocurre si se dispara un proyectil desde una altura y con una velocidad dadas, en dirección paralela a la superficie de la Tierra? Describirá una trayectoria parabólica y caerá. Si se aumenta la velocidad, el proyectil llegará cada vez más lejos, hasta eventualmente darle vuelta a la Tierra y regresar por la parte de atrás al punto desde el cual se disparó.

¿Cómo se puede determinar la magnitud de la aceleración centrípeta de la Luna?

Desde luego esta aceleración será radial, esto es, hacia el centro del círculo. Christian Huygens (1629-1695) la calculó:

Para esto supuso un cuerpo que se encuentra en *A* (véase la figura 2-4) y cuyo movimiento describe el arco de círculo *AC* en un tiempo *t*. Si no existiera una aceleración *a*, el cuerpo seguiría de *A* hasta *B* en movimiento rectilíneo uniforme, de modo que:

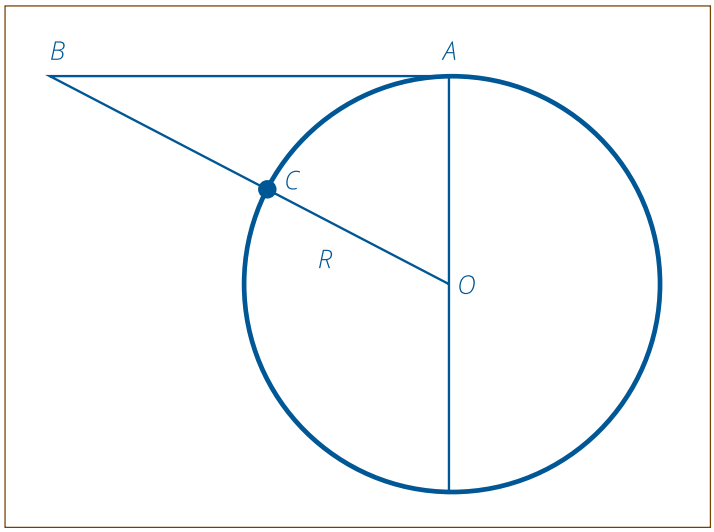


Figura 2-4.
Caída de la Luna.

$$\overline{AB} = \vec{v}t$$

Pero, por causa de dicha aceleración, se produce la "caída" ($\overline{BC}$) que según las investigaciones iniciadas por Galileo es:

$$\overline{BC} = \frac{1}{2}\vec{g}t^2$$

En el triángulo rectángulo *OAB* se tiene que, $(\overline{OA}) = (\overline{OC}) = R$, que es el radio del círculo y haciendo uso del teorema de Pitágoras

$$\overline{OB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AB}^2, \text{ donde } \overline{OB} = \overline{OC} + \overline{BC}$$

Substituyendo los valores anteriores, desarrollando los cuadrados y simplificando se obtiene,

$$\left(R + \frac{1}{2}at^2\right)^2 = R^2 + (vt)^2,$$
$$R^2 + aRt^2 + 1/4\left(a^2t^4\right) = R^2 + (vt)^2,$$
$$aRt^2 + \frac{1}{4}\left(a^2t^4\right) = v^2t^2.$$

Dividiendo ahora por t^2

$$aR + \frac{1}{4}\left(a^2t^2\right) = v^2$$

Para tiempos muy pequeños, lo que es necesario para explicar una curva continua, se puede despreciar el término que contiene a t^2, y llegar al resultado:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

Y con esta expresión matemática se puede evaluar el valor de la aceleración que hace girar a la Luna alrededor de la Tierra. Sustituyendo su velocidad y la distancia del centro de la Tierra al centro de la Luna, se obtiene:

$$a = 2.74 \times 10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}$$

Después se le ocurrió a Newton que estos resultados se podrían generalizar al sistema solar. Claro que este problema era mucho más complicado, ya que en este caso las órbitas no se pueden aproximar a círculos (son elipses), ni la velocidad de los planetas es constante.

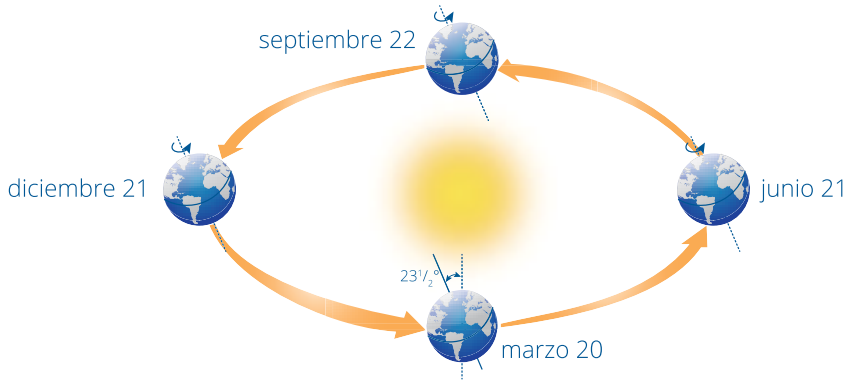


Figura 2-5.
Estaciones del año.

El movimiento de los planetas fue un problema que interesó a los astrónomos desde Ptolomeo hasta Copérnico, pero fue Johannes Kepler quien, analizando las observaciones planetarias de Tycho Brahe, pudo resumir dicho movimiento en tres leyes que llevan su nombre y que fortalecen la propuesta de Copérnico de que el Sol es el centro del sistema planetario y la Tierra y los demás planetas giran en torno a él (modelo heliocéntrico).

En particular, el movimiento de la Tierra en torno al Sol describe una elipse, además de la rotación sobre su eje, el cual está inclinado un ángulo de 23.5 grados respecto a una línea perpendicular al plano de la elipse (eclíptica). Cerca de los días en que en el hemisferio norte el día es más largo (solsticio de verano), los rayos solares caen más verticales sobre ese hemisferio y lo calientan más. Mientras que en el invierno ocurre lo contrario.

Leyes de Kepler

Kepler enunció sus leyes de la siguiente forma:

- *Primera ley.* Los planetas describen órbitas elípticas en las que el Sol se encuentra en uno de sus focos.
- *Segunda ley.* La línea que va del Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.
- *Tercera ley.* Los cubos de los semiejes mayores de las órbitas elípticas planetarias son proporcionales a los cuadrados de los periodos de los respectivos planetas.

Con estas leyes y su verificación llevada a cabo observando el movimiento de los satélites de Júpiter y Saturno, Newton formuló la *ley de la gravitación universal*, proponiendo que se cumple para cualquier cuerpo que esté en presencia de otro u otros.

Enunció su ley, matemáticamente, de la siguiente manera:

$$a = -\frac{GM}{r^2}$$

En esta ley, M es la masa del cuerpo atractor, G es la constante de gravitación universal (medida tiempo después por Cavendish) y r es la distancia a la que se mide la aceleración.

Es decir, la aceleración gravitacional que un cuerpo le imparte a otro es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa y directamente proporcional a una característica del cuerpo atrayente, a la que Newton llamó "carga gravitatoria".

Observó que esta característica era mayor cuanto mayor era la "cantidad de materia" del cuerpo atrayente, y en consecuencia, la identificó con la masa gravitacional.

Esta ley fue comprobada en todos los casos conocidos y permitió a Simon Laplace (1749-1827) construir su trascendental *Mecanique Celeste*. Pero no sólo esto, sino que sentó las bases para predecir la existencia de otros planetas. Tal fue el caso de Neptuno, descubierto por Le Verrier (1811-1877).

Actualmente la *ley de la gravitación universal* explica satisfactoriamente el comportamiento de las estrellas binarias y la existencia de planetas en torno a otras estrellas.

El campo gravitatorio

Un tratamiento alternativo para describir la dinámica gravitacional, es decir, el movimiento de un objeto debido a la fuerza de atracción gravitacional de otro, es mediante el concepto de *campo gravitatorio*. El concepto de *campo* fue introducido por Faraday, en el siglo XIX, en conexión con sus experimentos de electricidad.

El campo gravitatorio E_g alrededor de un objeto de masa m_1, se define como la fuerza que ejerce sobre un objeto de masa unitaria situado a una distancia r de él, esto es:

$$E_g = G\frac{m_1}{r^2}$$

Si en un punto del espacio se coloca otro objeto con masa m_2, éste experimentará una fuerza de atracción gravitatoria dada por:

$$F = E_g m_2$$

Nótese que al sustituir E_g en esta ecuación, se recupera la *ley de la gravitación universal* de Newton:

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

En este contexto, es claro que, en contraste con el hecho de que la fuerza de atracción gravitatoria sólo se presenta entre dos objetos, el campo es una propiedad de un solo objeto que modifica a todo el espacio que lo rodea, afectando a todos los objetos en él.

Aportación de Newton a la ciencia: explicación del movimiento en la Tierra y en el universo

Se han enunciado las leyes del movimiento de los objetos sobre la superficie de la Tierra, ahora se discutirá el movimiento de los objetos en el universo, sujetos a fuerzas gravitacionales.

Las fases de la Luna

Hace mucho tiempo se creía que la Luna era un ser que era "devorado" lentamente cada mes y que por arte de magia, volvía a aparecer. Esta explicación era lógica para explicar las fases de la Luna, desde el momento en que comenzaba a disminuir de tamaño, hasta que se desvanecía totalmente, repitiendo el ciclo para volver a la fase de Luna llena.

En la actualidad, se sabe que estas fases se deben a que la Luna gira alrededor de la Tierra. Durante el movimiento de traslación alrededor de la Tierra, la parte iluminada de la Luna que ve un observador terrestre, va cambiando.

El tiempo aproximado entre dos lunas nuevas resulta ser de veintinueve días y medio, y este lapso de tiempo recibe el nombre de periodo o mes sinódico.

Año tras año, las fases de la Luna se repiten con exactitud, así que en tiempos remotos sirvieron para medir el tiempo (figura 2-6).

La luna nueva comienza cuando el Sol, la Luna y la Tierra (en este orden) están situados en línea recta. Al cabo de tres días la Luna ha avanzado parte de su camino alrededor de su órbita mensual, puede verse que la parte iluminada va aumentando lentamente sin cesar. A los siete días y medio, visto desde la Tierra, aparece iluminada la mitad del hemisferio de la Luna y a esa mitad se le llama cuarto creciente. Hasta aquí, la Luna ha recorrido la cuarta parte de su órbita.

A los once días, durante la fase de la luna gibosa creciente se alcanzan a ver las tres cuartas partes del hemisferio de la Luna y, aproximadamente quince días después de la Luna nueva, la parte iluminada se ha extendido totalmente hasta formar la Luna llena.

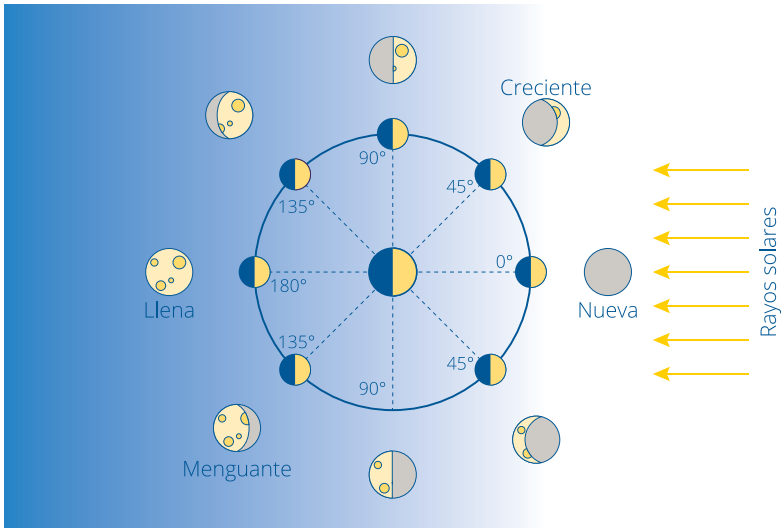


Figura 2-6.
Fases de la Luna y posiciones.

Como la Luna gira poco más de doce veces alrededor de la Tierra en tanto ésta da una vuelta en torno al Sol al acercarse el satélite a éste, el ciclo entero se repite en forma inversa y principia a menguar, es decir, a desaparecer poco a poco la superficie iluminada de la Luna, produciéndose las fases de menguante giboso, cuarto menguante y menguante hasta llegar a la Luna nueva.

Siempre se ve desde la Tierra la misma cara de la Luna. Esto significa que la Luna gira sobre su propio eje una vez por cada vuelta que da alrededor de la Tierra, es decir, que un día lunar dura lo mismo que un mes sinódico: veintinueve días 12 horas 43 minutos y 12 segundos. Esto es, sus periodos de rotación y de translación coinciden.

Los eclipses

Los eclipses dependen de los movimientos combinados de tres cuerpos celestes, el Sol, la Luna y la Tierra. La Luna gira alrededor de la Tierra casi en el mismo plano en que la Tierra gira en torno al Sol.

Los eclipses solares se producen cuando la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra y los eclipses lunares cuando la Tierra se encuentra entre el Sol y la Luna.

Sin embargo, como la órbita de la Luna está ligeramente "inclinada" (unos cinco grados) con respecto al plano formado por la Tierra y el Sol, nuestro satélite queda frecuentemente fuera de la línea directa entre el Sol y la Tierra. Debido a esto, los eclipses se producen con poca frecuencia.

Hay años en los que la sombra de la Tierra no llega a tocar la Luna, pero, en general, la Luna se coloca frente al Sol por lo menos dos veces al año. Debido a esto, cada año se producen dos eclipses solares.

El mayor número de eclipses que pueden producirse en un año son siete, de los cuales tres son lunares y cuatro solares. Por lo general, hay de cuatro a cinco eclipses anualmente.

Los eclipses totales de Sol son espectáculos memorables. Debido a una notable coincidencia, en ningún otro planeta se puede ver algo semejante. Dado que el diámetro del Sol es cuatrocientas veces mayor que el de la Luna y, además, el Sol se encuentra cuatrocientas veces más alejado de la Tierra que la Luna, para los observadores terrestres, tanto el Sol como la Luna parecen tener el mismo tamaño. Debido a esto, nuestro satélite llega a cubrir exactamente el disco solar, dejando ver solamente los brillantes rayos que despide la corona solar, produciéndose un eclipse.

Desgraciadamente, la punta de la sombra cónica de la Luna es diminuta cuando llega a tocar la Tierra. Durante un eclipse total esta sombra abarca, a lo sumo, una franja de doscientos sesenta y nueve kilómetros de ancho, y únicamente los que se encuentren dentro de ella podrán disfrutar del espectáculo que les brinda el eclipse solar. Los que estén alejados unos tres mil doscientos kilómetros de dicha sombra podrán ver un eclipse parcial. En la figura 2-7 (no a escala) se muestran las posiciones del Sol y de la Luna durante un eclipse. Sólo las personas que estén en la Tierra en la región de "umbra", o pequeña sombra obscura, podrán ver el eclipse total. Las personas que se encuentren en la "penumbra", o sombra exterior, verán el eclipse parcial. En el resto de nuestro planeta, donde no se proyecta sombra alguna de la Luna, el eclipse no será visible.

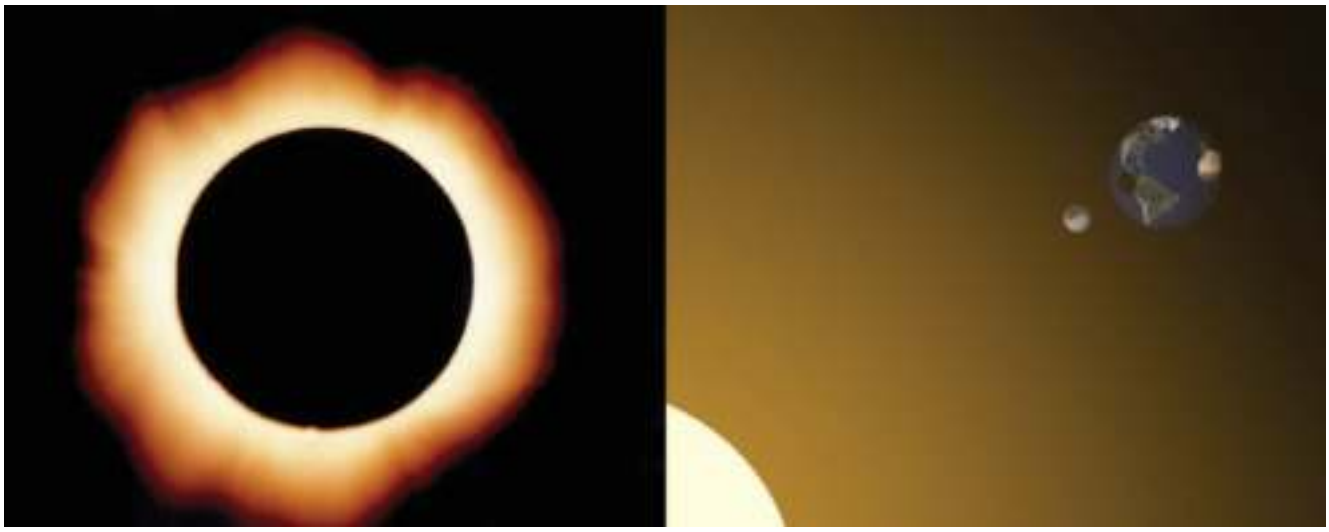


Figura 2-7.
Esquema de eclipses.

Un eclipse solar, incluyendo los momentos de eclipse parcial, dura en total unas cuatro horas desde el momento en que aparece el primer borde negro en el disco solar, hasta que se retira la Luna por el lado opuesto.

Cuando la Luna cubre completamente el disco solar, los espectadores de la Tierra quedan en una obscuridad casi tan profunda como la de la noche. Los pájaros, desconcertados, vuelan a sus nidos creyendo que es de noche y, lo más extraño de todo, resulta ver cómo las estrellas brillan en el negro cielo a pesar de que todavía es pleno día. Otro de los espectáculos maravillosos es la corona solar que en esos momentos se destaca perfectamente como un halo de rayos de suaves colores y que en ninguna otra ocasión llega a verse, debido al resplandor del Sol.

Los eclipses totales de Sol tienen una duración máxima de 7 minutos y 40 segundos, pero, en general, son mucho más breves.

Los eclipses de Luna son mucho más comunes, ya que todos los habitantes de un hemisferio de la Tierra pueden verlos simultáneamente, y no en una zona limitada, como ocurre con los eclipses totales de Sol. En la Tierra, todos tenemos la oportunidad de ver eclipses lunares más de una vez en nuestra vida, pero son

pocas las personas que llegan a ver un eclipse total de Sol. Los eclipses totales de Luna empiezan con un obscurecimiento gradual de nuestro satélite cuando éste penetra en los bordes de la sombra de la Tierra (penumbra). Lo que finalmente produce el eclipse total es el centro de la sombra terrestre (umbra), y algunas veces llega a durar hasta una hora y 50 minutos.

Sin embargo, durante un eclipse total, la Luna presenta un tono rojizo. Esto es debido a la refracción de la luz solar sobre el borde de la Tierra, causada por la atmósfera. La duración total de un eclipse lunar es de cuatro horas aproximadamente. Para un espectador que estuviera situado en la Luna, esto sería un eclipse total de Sol, ya que éste queda oculto por la Tierra incluyendo la corona solar y no únicamente su disco.

Viajes interplanetarios

Si puede hablarse de algún beneficio que haya traído consigo la II Guerra Mundial, éste sería el impulso científico y tecnológico en diversos aspectos. En particular el desarrollo de misiles de largo alcance dio las pautas para la exploración del espacio. Un personaje clave en esta línea de investigación fue el alemán Wernher von Braun (1912-1977), quien colaboró con el ejército alemán en el diseño y construcción de los misiles intercontinentales V2, y expresó públicamente su pasión por los viajes espaciales. Hacia el final de la guerra, von Braun se rindió ante los Estados Unidos junto con varios científicos de su equipo cediendo sus diseños. En 1950, el equipo de von Braun diseñó y construyó el misil balístico Júpiter y los cohetes Redstone usados por la NASA para los primeros lanzamientos del programa Mercurio. Diez años después, estos desarrollos dieron lugar a los cohetes Saturno, los cuales hicieron posible la llegada del hombre a la Luna en 1969.

Estos cohetes funcionan expulsando el gas, producto de la combustión, a gran velocidad. La acción de salida del gas provoca una reacción que impulsa al cohete de acuerdo a la *tercera ley de Newton*.

Como se mencionó anteriormente, si se dispara un proyectil desde una altura y con una velocidad dadas, en dirección paralela a la superficie de la Tierra, éste describirá una trayectoria parabólica y caerá sobre la superficie, pero si se lanza a una velocidad mucho mayor, el proyectil podría dar vuelta a la Tierra y regresar por el lado opuesto al punto desde el cual se disparó. Cuando un cohete (o motor a reacción) es lo suficientemente potente como para elevar un cuerpo a una altura tal que rebase la atmósfera, donde no exista la fuerza de fricción con el aire, y además, la fuerza de atracción gravitacional sea mucho menor que en la superficie de la Tierra, y en este punto se desvía el proyectil en dirección paralela a la superficie, como en el caso anterior, con la velocidad suficiente, el proyectil daría la vuelta a la Tierra, esto es, estaría en órbita como los satélites artificiales actuales, aún sin el impulso del cohete.

En ese momento, se usa el motor a reacción para salir de la órbita terrestre, aprovechando además el ímpetu que llevaba el proyectil al orbitar. Con la dirección correcta y en las condiciones adecuadas de posición de la Luna respecto a

la Tierra, este impulso inicial debe bastar para colocar ahora el proyectil en órbita lunar, donde para descender a la superficie de la Luna sólo es necesario disminuir la velocidad.

Éstas son las ideas básicas que intervienen en los viajes reales a la Luna y a otros planetas. Hasta la fecha, sólo ha habido misiones tripuladas a la Luna y se trabaja arduamente para que el hombre llegue a pisar la superficie marciana. Sin embargo, se ha logrado llevar a Marte varios robots controlados desde la Tierra los cuales han transmitido imágenes y datos geológicos de este planeta; parte del diseño de uno de ellos, el *Pathfinder*, se debe a un mexicano, el doctor César Sepúlveda.

Como el lector podrá darse cuenta, las bases para los viajes espaciales, desde el principio de funcionamiento de los cohetes a reacción, hasta los cálculos precisos del tiempo durante el cual éstos deben ejercer una fuerza al proyectil, e incluso en la predicción de las posiciones planetarias, fueron las *leyes de Newton* y la *ley de la gravitación universal*.

La energía y el movimiento

- Energía mecánica: cinética y potencial
- Transformaciones de la energía cinética y potencial
- Principio de la conservación de la energía

Para introducir el concepto de energía, se parte de la idea de que ella se manifiesta en una amplia variedad de formas: eléctrica, mecánica, térmica, electromagnética, química, atómica, acústica, luminosa, etcétera.

Son diferentes manifestaciones de la energía: un rayo haciendo contacto con la copa de un árbol, un tornado levantando partes de la construcción de una granja, un volcán en erupción, la caída de agua llegando a una planta hidroeléctrica, una persona trabajando con soldadura eléctrica, un automóvil saliendo de una gasolinera, una estación radiodifusora emitiendo su señal y un radiorreceptor captándola y emitiendo sonido, un boxeador conectando un golpe en la cara de su oponente.

¿Qué forma o formas de energía están presentes en cada uno de los ejemplos anteriores?

¿En cuáles de ellos interviene sólo la naturaleza y en cuáles, la tecnología?

La propiedad más importante de la energía, como se verá más adelante, es que se conserva.

La energía es una magnitud física que caracteriza el estado de un cuerpo y la cantidad de energía que posee se puede variar al intercambiarla con otro u otros cuerpos.

Con estas nociones sobre el concepto de energía, se puede marcar la diferencia entre el uso que se da al término energía en ciencia y el que se le da en el lenguaje cotidiano, donde algunas veces se usa el término energía con connotaciones muy diferentes a la aceptada en ciencia.

Así, por ejemplo, cuando una persona habla a otra con decisión y firmeza se dice que lo hace con energía; o también, cuando en un grupo de personas que realizan alguna actividad priva un ambiente de optimismo y buena relación

se dice que hay "energía positiva" en ese grupo. Estas acepciones cotidianas del término *energía* no están relacionadas con el concepto científico.

En Física, se define a la energía como la capacidad de producir *trabajo*, término que se explicará a continuación.

Cuando sobre un cuerpo actúa la fuerza de otro cuerpo desplazándolo una cierta distancia, se transmite energía de un cuerpo a otro; entonces se dice que se realiza trabajo. Posteriormente se verá que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Por ejemplo, la energía almacenada en un litro de gasolina se puede consumir en el motor de un automóvil, esta energía se ha transferido al automóvil para moverlo una cierta distancia.

Si se quiere que el automóvil recorra el doble de la distancia, se tendría que duplicar la cantidad de gasolina; así, se dice que el trabajo que le costó al motor recorrer esta distancia será proporcional a ella.

En general, si se ejerce una fuerza y ésta produce un desplazamiento, se dice que se ha realizado trabajo.

Entonces se define al trabajo como:

Fuerza × distancia recorrida.

Sus unidades en SIU serán newton por metro, a esta unidad se le llama joule (J), en honor a James Prescott Joule (1818-1889), quien trabajó haciendo experimentos encaminados a establecer el principio de conservación de la energía.

Cuando la fuerza tiene la misma dirección que el movimiento del objeto, se transmite energía y por lo tanto se realiza trabajo. Si la fuerza es perpendicular a la dirección del movimiento, ni se transmite energía, ni se realiza trabajo. ¿Pero qué sucede cuando la fuerza forma un ángulo cualquiera con la dirección del movimiento del cuerpo? La fuerza entonces posee dos componentes, una en la dirección del movimiento del cuerpo y otra perpendicular a esta dirección. La componente de la fuerza en la dirección del movimiento realiza trabajo sobre el cuerpo transmitiéndole energía al movimiento y la perpendicular no realiza trabajo.

La conservación de la cantidad de movimiento o ímpetu

Hasta ahora se ha estudiado una ley que trata de las fuerzas en un sistema aislado. En lo que sigue se hablará de otra ley en la que intervienen los efectos que éstas producen, esto es una ley que relacione las fuerzas con el movimiento.

La masa y la velocidad de un objeto en movimiento se pueden conjuntar en una magnitud cinética más simple que es llamada cantidad de movimiento o ímpetu, dada por el vector:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Es una característica que poseen los cuerpos en movimiento y que perdura aunque haya cesado la fuerza que lo produjo.

Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza, ya se sabe que su velocidad permanecerá constante, y por lo tanto su ímpetu también será constante

$$\vec{p} = m\vec{v} = \text{constante}$$

Ésta es otra forma de presentar la *ley de la inercia*.

Si se consideran dos cuerpos de masas m_1 y m_2 moviéndose en una dimensión en sentidos opuestos que chocan, y se miden sus velocidades antes del choque v_1 y v_2 y después del mismo v_1' y v_2', se tiene

$$-\frac{v_1 - v_1'}{v_2 - v_2'} = k_{12}$$

donde k_{12} es un número positivo.

Si se repite el experimento con las mismas masas m_1 y m_2, ahora con otras velocidades iniciales u_1 y u_2 y otras finales u_1' y u_2', se obtiene que:

$$-\frac{u_1 - u_1'}{u_2 - u_2'} = k_{12}$$

Se observa que el cociente de las velocidades tiene el mismo valor en ambos casos k_{12}, y que además, experimentalmente resulta ser igual al cociente de las dos masas

$$k_{12} = \frac{m_2}{m_1}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} m_1 v_1 - m_1 v_1' &= m_2 v_2' - m_2 v_2, \\ m_1 v + m_2 v_2 &= m_1 v_1' - m_2 v_2', \\ p_1 + p_2 &= p_1' + p_2' = \text{cte.} \end{aligned}$$

Si se tiene un conjunto de cuerpos el resultado anterior se cumple también para todos, de manera que:

$$p_1 + p_2 + p_3 + \ldots = \text{cte.}$$

Ésta es la ley de conservación del ímpetu para un sistema aislado, es decir, en ausencia de fuerzas externas.

La energía cinética

Leibniz (1646-1716) propuso que el "efecto de una fuerza" no era proporcional a v, sino a v^2 y que ésta era la cantidad que se conservaba en los fenómenos mecánicos.

Siguiendo sus ideas, se define la energía cinética de un cuerpo de masa *m* y velocidad *v*, como

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

y la de un sistema de *n* cuerpos como

$$T = \frac{1}{2}m_1v_1{}^2 + \frac{1}{2}m_2v_2{}^2 + \frac{1}{2}m_3v_3{}^2 + \ldots$$
$$T = \sum \frac{1}{2}m_nv_n{}^2$$

Donde la letra griega mayúscula ∑ (sigma) se usa para representar la suma, en este caso la suma de cada una de las energías cinéticas de los cuerpos del sistema. Definida así, se verá si realmente se conserva como opinaba Leibniz.

Si se trata de un sistema aislado formado por una sola partícula, sobre la que no actúa ninguna fuerza, se conserva la energía cinética. Esto se debe a que el movimiento de la partícula es uniforme, por lo que v^2 es constante. sEntonces:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \text{constante}$$

Considere ahora un sistema en el que no intervienen fuerzas, formado por dos cuerpos que colisionan de masas m_1 y m_2. Antes de chocar llevan velocidades v_1 y v_2 respectivamente y velocidades v_1' y v_2' después del choque.

La energía cinética antes del choque T_i será:

$$T_i = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$$

y la energía cinética después del choque T_f será:

$$T_f = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2$$

Si, como decía Leibnitz, la energía cinética se conserva:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 = \text{cte.}$$

Christian Huygens, realizando experimentos, estableció que esto sólo es válido para las colisiones elásticas y para éstas existen dos conservaciones, la del ímpetu y la de la energía cinética.

Se mencionó que el trabajo se podía definir como el producto de la fuerza aplicada por la distancia recorrida, y ya que $F = ma$, el trabajo W realizado por la fuerza será:

$$W = Fx = m \cdot a \cdot x$$

Dado que

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

entonces se tiene que:

$$a(t_2 - t_1) = v_2 - v_1$$

Considerando $t_1 = 0$ y $t_2 = t$, la ecuación anterior queda:

$$at = v_2 - v_1,$$
$$t = \frac{(v_2 - v_1)}{a}$$

Para aceleración constante:

$$x = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)t$$

Si se sustituye t se tiene:

$$x = \frac{(v_1 + v_2)(v_2 - v_1)}{2a}$$

de donde

$$2ax = v_2^2 - v_1^2$$

Si $v_1 = 0$ y $v_2 = v$, se tiene

$$ax = \frac{v^2}{2}$$

Sustituyendo en la ecuación para el trabajo W,

$$W = Fx = \frac{mv^2}{2}$$

Así que el trabajo realizado para acelerar un cuerpo de masa *m* desde el reposo hasta una velocidad *v*, será igual a la energía cinética que se le transmitió, y por lo tanto tendrán las mismas unidades: joules.

Energía potencial

La energía cinética es un tipo de energía asociada al movimiento. Ahora se verá una energía asociada a la posición de un objeto. Si se estira una liga, o se levanta del suelo un objeto a una cierta altura, se almacena *energía potencial*.

En el caso gravitacional, cuando se deja caer un objeto que se levanta del suelo una altura h_1, la aceleración es *g*, y *x* es igual a h_1; entonces:

$$gh_1 = \frac{v_1^2}{2}$$

Multiplicando ambos lados por la masa *m* del cuerpo, se tiene:

$$mgh_1 = \frac{mv_1^2}{2}$$

El lado izquierdo de la ecuación es la energía potencial del cuerpo en reposo antes de soltarlo, y el lado derecho será su energía cinética al llegar al suelo. Despejando, se puede obtener la velocidad con la que el objeto llega al suelo.

$$v_1^2 = 2gh_1$$

Considerando que la suma de la energía potencial y la energía cinética del cuerpo en cualquier punto de su caída es:

$$mgh + \frac{mv^2}{2} = E = \text{Energía mecánica total}$$

Como el objeto partió del reposo, en el punto más alto h_1, la velocidad es cero, por lo tanto la energía mecánica total en ese punto es

$$E = mgh_1$$

En el punto más bajo, $h = 0$, la energía es sólo cinética:

$$E = \frac{mv_1^2}{2}$$

Esta ecuación se puede obtener al pensar que, en cualquier punto de la trayectoria entre $h = h_1$ y $h = 0$, la suma de la energía potencial y cinética tiene el mismo

valor. Es decir, $E = mgh + {}^{1}/_{2}mv^2$ = energía mecánica total, se conserva a lo largo de la caída.

Actividad

Deduzca, de la conservación de la energía mecánica total, que

$$-mgh_1 = \frac{mv_1^2}{2}$$

Este teorema de conservación es válido solamente en ausencia de fuerzas de fricción.

La conservación de la energía total nos permite calcular la velocidad, dada la altura en cualquier punto de la trayectoria o viceversa. Una aplicación inmediata de esta ley de conservación podría ser el cálculo de la velocidad que llevará un carrito en una montaña rusa dada la altura h_1 de la cima inicial, y considerando que parte del reposo (figura 2-8):

$$E = mgh_1 = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

Para una altura h cualquiera tendremos que la velocidad es:

$$v^2 = 2g(h_1 - h)$$

Esto es válido independientemente de las cimas que haya subido o bajado entre su posición inicial y la final a la altura h.

Nótese que si $h = 0$, recuperamos el valor de la velocidad de caída $v = (2gh_1)^{1/2}$, y si $h = h_1$, entonces $v = 0$.

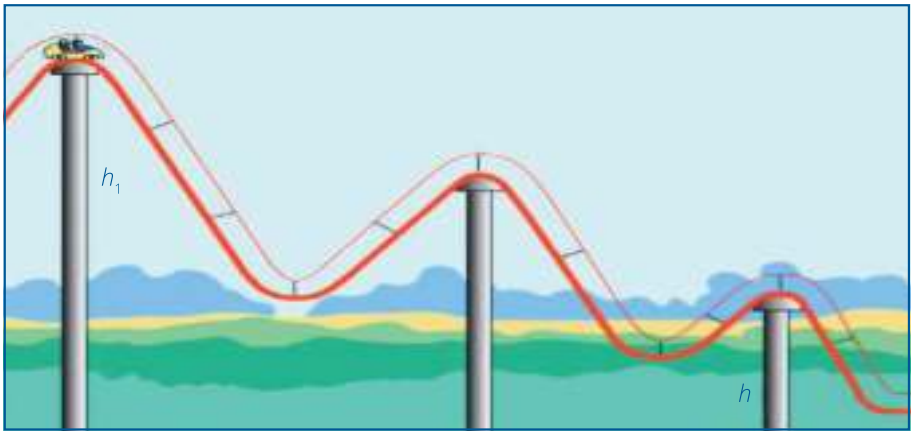


Figura 2-8.
Montaña rusa.

3 | Un modelo para describir la estructura de la materia

Los modelos en la ciencia

Características e importancia de los modelos en la ciencia

En los esfuerzos por conocer más y mejor de los fenómenos naturales, los hombres y las mujeres dedicados a la actividad científica han contado, desde hace muchos siglos, con un importante recurso: los modelos.

Al elaborar un modelo, los investigadores reproducen parte de la realidad o, más bien, un aspecto de la realidad que les interesa estudiar, e integran en él los factores más relevantes del fenómeno bajo estudio.

Un buen modelo científico da información sobre el fenómeno bajo estudio y ayuda a predecir su comportamiento ante cambios en sus condiciones iniciales. El modelo es una creación de los investigadores, que les ayuda a imaginar y entender el aspecto de la realidad en él representado; sobre todo porque pueden manipularlo y modificar sus condiciones y parámetros para conocer el comportamiento del fenómeno bajo estudio.

En la actividad científica y, en particular en la física, los modelos más empleados son los físicos y matemáticos.

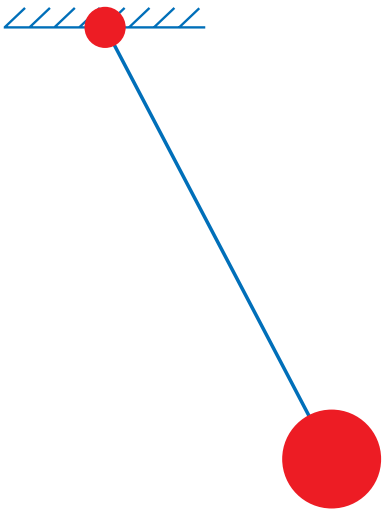


Figura 3-1.
Péndulo.

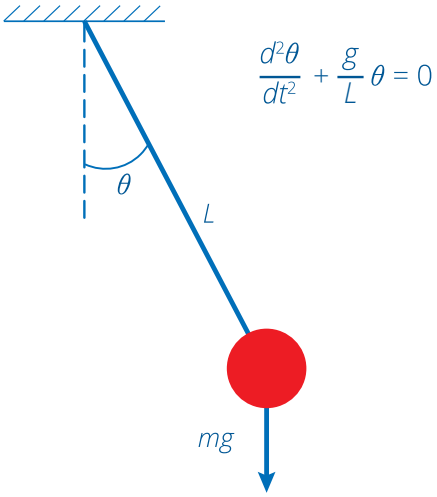


Figura 3-2.
El péndulo simple y su ecuación.

Los modelos físicos son una representación material del aspecto de la naturaleza a estudiar; esto es, una reproducción a escala, un prototipo en el que se reproducen los aspectos o parámetros a estudiar.

Los modelos matemáticos son expresiones matemáticas que reproducen cuantitativamente el comportamiento de un fenómeno natural, donde las variables involucradas representan los factores que intervienen en dicho fenómeno y determinan su comportamiento. Estos modelos se obtienen a partir de hipótesis y aproximaciones.

En la actualidad, el uso de las computadoras ha permitido la representación visual de modelos físicos y la evaluación de los modelos matemáticos, lo cual ha hecho posible simular el fenómeno y estudiarlo manipulando las variables del modelo correspondiente.

El valor de un modelo científico está relacionado directamente con la medida en que los resultados predichos con base en él, concuerden con las observacio-

Figura 3-3.
Mirascopio real y la simulación del mismo.

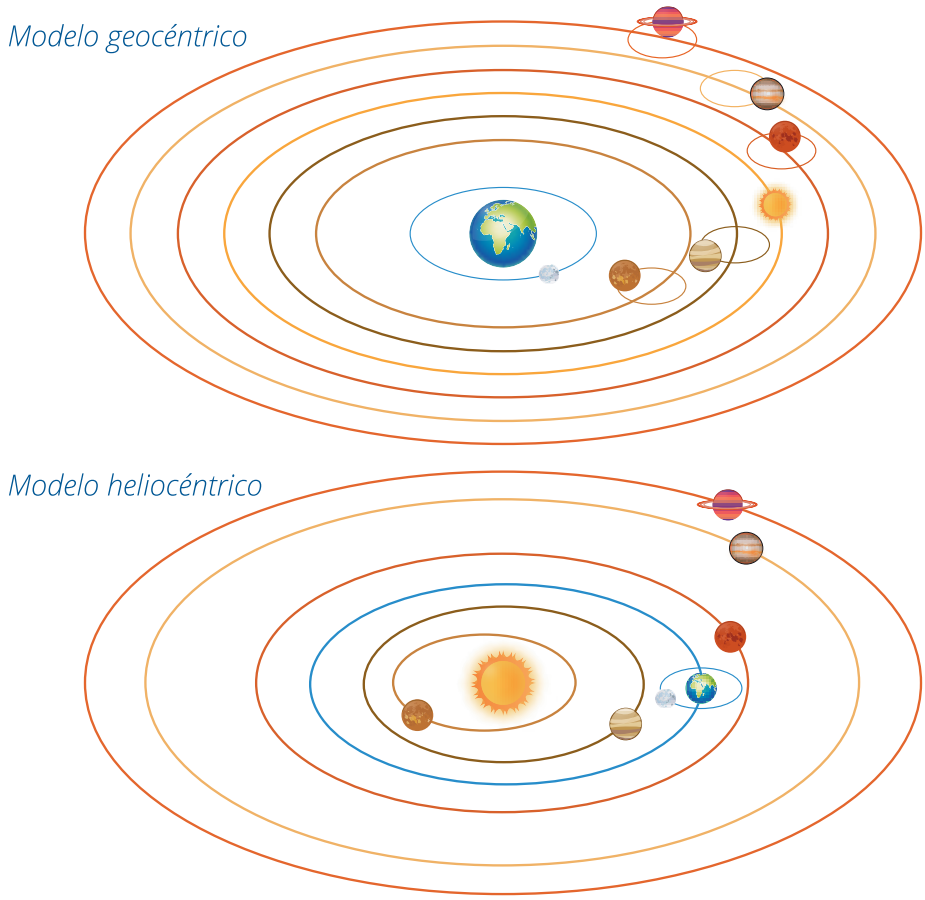


Figura 3-4. Modelo geocéntrico del universo y modelo heliocéntrico del universo. El modelo geocéntrico fue sustituido por el heliocéntrico en el siglo XVI.

nes del fenómeno real. Estos modelos pueden ser constantemente mejorados al someterlos a diferentes experimentos y pruebas.

El progreso de la ciencia depende, en buena medida, del desarrollo de mejores modelos para entender el mundo real. Cabe hacer notar que un modelo puede ser abandonado y sustituido por otro que represente mejor el fenómeno bajo estudio.

Ideas en la historia acerca de la naturaleza continua y discontinua de la materia: Demócrito, Aristóteles y Newton; aportaciones de Clausius, Maxwell y Boltzmann

La búsqueda de un modelo para describir la estructura de la materia se remonta al siglo V a. C. en la Grecia antigua. A mediados de ese siglo, Leucipo (~450 a. C.) propuso la teoría atómica de la materia y unos treinta años después la continuó Demócrito.

Demócrito (460-370 a. C.) nació en la ciudad griega de Abdera y contó con recursos económicos que le permitieron viajar durante varios años. Pasó cinco años en Egipto estudiando matemáticas. Fue a Babilonia, de ahí pasó a Persia y,

Figura 3-5.
a) Demócrito de Abdera. *b)*Aristóteles. *c)* Epicuro.

probablemente, a India. Lo destacable es que Demócrito viajó como filósofo en busca de conocimientos y aprendió mucho a partir de sus informantes egipcios, caldeos y persas. Se interesó en todas las ramas de la ciencia estudiadas en su época conoció de matemáticas, astronomía y medicina y también de psicología y ética. Se preocupaba por dar respuesta a preguntas como: *¿hasta dónde podría dividirse una gota de agua?* Pensaba que se podrían obtener gotas cada vez más pequeñas, hasta casi perderlas de vista. Pero *¿hay algún límite?* Leucipo, quien fue su maestro, había intuido que esa división tenía un límite. Demócrito hizo suya esa idea y enunció que cualquier sustancia podía dividirse sólo hasta ese límite, obteniendo así el trozo más pequeño de cualquier material que sería entonces indivisible: él lo llamó *átomo*.

Demócrito recibió de Leucipo la teoría atómica y la desarrolló proponiendo una consistente explicación del mundo.

El mundo, planteó Demócrito, está hecho de dos partes: lo material y el vacío. Lo material está compuesto de pequeñas partículas llamadas átomos (que no pueden dividirse en otras más pequeñas). Los átomos son infinitos en número, eternos y absolutamente simples. Toda sustancia, todo objeto simple, está construido a partir de estos átomos. Las posibles combinaciones entre ellos son infinitas e infinitas las maneras de hacerlo. Los objetos existen en tanto los átomos que los constituyen permanezcan unidos y dejan de existir cuando sus átomos se separan unos de otros. Los interminables cambios de la realidad se deben a la continua agregación o desagregación de los átomos.

Un siglo después, Aristóteles (384-322 a. C.) rechazó la teoría atómica y lo que podría ser llamado materialismo de Demócrito. Él rechazó el concepto de vacío, porque no podía concebir el movimiento excepto en un medio definido.

La teoría de Demócrito fue retomada por Epicuro (341-270 a. C.) a fines del siglo IV a. C. y popularizada por Lucrecio en la primera mitad del siglo I a. C.

A la propuesta de Demócrito, Epicuro agregó algunos detalles interesantes. Planteó que todo, ya sea natural o espiritual, está hecho de átomos; que estos átomos, de varias formas, son dispersados en todas direcciones; no están necesariamente pegados unos a otros, están en un vacío, de manera que pueden mo-

Figura 3-6.
a) Lucrecio.
b) Sir Isaac Newton.

verse de un lugar a otro y colisionar. Cuando un hombre muere, los átomos que constituyen su alma se desenlazan y se distribuyen, igual que los de su cuerpo; los dioses también están hechos de átomos.

En la primera mitad del siglo I a. C. Lucrecio escribió el poema *De rerum natura* (Sobre la naturaleza de las cosas) en el cual expone la doctrina epicúrea sobre la naturaleza, esto es, el cosmos, el hombre, la historia de la humanidad, etc. El poema, que se cuenta entre los primeros libros impresos luego de la invención de la imprenta, representa un documento importante para el estudio de la doctrina atomista griega que se inicia en la época de Leucipo y Demócrito y se renueva con el epicureísmo. Lucrecio se inspiró en los escritos de Epicuro y su escuela.

En el siglo XVII el francés Pierre Gassendi (1592-1655), amigo de varios científicos de su tiempo y entusiasta impulsor del desarrollo de la ciencia, revivió y difundió la antigua teoría atomista de Demócrito y de Epicuro en sus obras *Vida, costumbres y doctrina de Epicuro*, publicada en 1647, y *Tratado sobre la filosofía de Epicuro*, de 1649. Entre los lectores de estas obras se contó al entonces joven físico y químico inglés Robert Boyle (1627-1691), quien se abocó a intentar explicar de manera racional y verificable las diferencias entre los compuestos, y ello con base en la teoría atómica de Demócrito y Epicuro. Boyle consideraba que toda sustancia está compuesta de corpúsculos indivisibles (los átomos), de diversas clases y tamaños; hay pocas variedades de átomos y la enorme variedad de la naturaleza se explica por la diferente agrupación o disposición geométrica de los átomos. Cada elemento químico está compuesto por átomos idénticos dispuestos de una manera que es característica del elemento en cuestión.

En ese mismo siglo XVII, otro partidario entusiasta de la teoría atómica de la materia fue Isaac Newton (1642-1727), quien trató de explicar las fuerzas químicas y la cohesión como resultados de fuerzas de atracción. Eran los esbozos de la creación de una química teórica fundada en la física.

A principios del siglo XIX el químico inglés John Dalton (1766-1844) dio a conocer sus primeros trabajos en los que apoya la teoría atómica de la materia, con base en resultados experimentales. Dalton, más conocido por su ley de las presiones parciales en gases y por la ley Henry-Dalton relativa a la absorción de

los gases por el agua, introdujo un sistema de símbolos químicos que contenía una idea nueva muy importante: además de representar a cada átomo mediante un símbolo, la fórmula de una sustancia compuesta resultaba de combinar los símbolos de los elementos que la constituían, con lo cual se mostraba el número de átomos de cada elemento que intervenía en la formación de la molécula de la sustancia.

El paso de la teoría atómica de la materia, iniciada por Leucipo y Demócrito, al modelo cinético de partículas, parte desde el aporte de Epicuro, cuando plantea que los átomos "están en un vacío, de manera que pueden moverse de un lugar a otro y colisionar", y los científicos que impulsaron este modelo cinético de partículas fueron, principalmente, Maxwell y Boltzmann.

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) es reconocido por su importante contribución teórica en relación con los fenómenos electromagnéticos; su producción, sin embargo, abordó otras ramas de la física como el calor, la cinemática o la mecánica estadística. De hecho, su segunda contribución importante a la física fue su teoría estadística de los gases, en la que mostró que, en el estado de equilibrio, los choques al azar entre las moléculas de un gas, aumentan la velocidad de las moléculas lentas y disminuye la de las muy rápidas, produciéndose una distribución de velocidades en la que la mayoría de ellas se agrupan en torno a la velocidad media. Estas investigaciones de Maxwell fueron continuadas por el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906). A ambos se les considera fundadores de la mecánica estadística clásica o teoría estadística de los movimientos mecánicos de conjuntos muy numerosos de elementos similares, que cumplen las leyes de la mecánica clásica. Boltzmann propuso la ley conocida con su nombre, que permitió explicar mediante una combinación de leyes mecánicas y de hipótesis estadísticas, la segunda *ley de la termodinámica* formulada por el físico alemán Rudolf J. E. Clausius (1822-1888). La obra principal de Boltzmann es *Lecciones sobre la teoría de los gases*.

Figura 3-7.
a) James Clerk Maxwell. *b)* Ludwig Eduard Boltzmann. *c)* Rudolf Julius Emmanuel Clausius.

Aspectos básicos del modelo cinético de partículas: partículas microscópicas indivisibles, con masa, movimiento, interacciones y vacío entre ellas

El modelo cinético de partículas es un valioso recurso para estudiar y entender la estructura de la materia y su comportamiento; en particular, ha resultado muy útil en el estudio del comportamiento de los gases ante cambios en sus principales variables: presión, volumen, temperatura y cantidad de materia. En este modelo se considera a la materia compuesta de partículas microscópicas (esferas duras y lisas) indivisibles, con masa, movimiento, interacción y vacío entre ellas. En el caso particular de un gas ideal, se considera a estas partículas colisionando constantemente unas con otras y con las paredes del recipiente que las contiene, y que cumplen con las leyes de la mecánica clásica.

La estructura de la materia a partir del modelo cinético de partículas

Las propiedades de la materia: masa, volumen, densidad y estados de agregación

En el universo la materia se manifiesta en cuatro distintos estados: sólido, líquido, gaseoso y plasma. Los tres primeros son los estados de agregación de la materia más comunes en nuestro entorno y son fácilmente explicables a partir del modelo cinético de partículas.

La clasificación de los materiales en sólidos, líquidos o gaseosos depende de la facilidad con que se pueda variar su forma y volumen.

Sólidos. En este estado de agregación, las fuerzas de atracción entre las moléculas son muy intensas; de manera que cada molécula tiende a conservar su posición respecto a sus vecinas y el sólido mantiene su forma, a menos que se ejerzan sobre él fuerzas suficientemente grandes como para alterar su estructura. Esas mismas fuerzas de atracción intermoleculares ofrecen una gran resistencia a modificar su volumen, de modo que un sólido tiene una forma y un volumen definidos.

Líquidos. En éstos, las fuerzas de atracción entre las moléculas son menos intensas que en los sólidos; y las moléculas no tienen posiciones fijas respecto a sus vecinas, pero sí ofrecen resistencia a modificar su volumen. Por lo tanto, los cuerpos en este estado de agregación tienen volumen definido (poco compresibles), pero no una forma definida, es decir, que puede ser modificada, adoptando la forma del recipiente que los contiene debido a la fuerza de gravedad. En situación de ingravidez, una gota de agua adoptaría la forma esférica.

Gases. En este estado de agregación, las fuerzas de atracción intermoleculares son aún menores que en el caso anterior y las moléculas se mueven azarosamente chocando unas con otras y con las paredes del recipiente que las contiene. Los gases también carecen de forma definida, adoptando la forma del recipiente;

tampoco tienen volumen definido, ya que ocupan siempre todo el volumen del recipiente, independientemente de su capacidad y ofrecen una resistencia relativamente pequeña al cambio de volumen. Lo anterior se puede constatar aumentando o disminuyendo el volumen de aire contenido en una jeringa con la salida obstruida, desplazando el émbolo en una u otra dirección.

Cabe destacar que estos tres estados de agregación de la materia tienen algunas características comunes; por ejemplo, en los tres estados los cuerpos están formados por átomos y moléculas, tienen masa y ocupan un volumen. Una característica que sólo es común en líquidos y gases es la fluidez, que consiste en que éstos pueden pasar con facilidad de un recipiente a otro a través de una tubería adoptando la forma del contenedor. Esto es posible porque las moléculas de un fluido no tienen posiciones fijas.

La densidad de los cuerpos

Es común escuchar la afirmación de que *el acero es más pesado que la madera*. Sin embargo, ésta no es correcta, ya que una viga de madera pesa más que un clavo de acero. La afirmación correcta es que el acero es más denso que la madera. En el caso de dos cuerpos de igual forma y tamaño, sí pesa más el construido de acero que el de madera. Al establecer la condición de que ambos cuerpos posean igual forma y tamaño, se está afirmando que los dos tienen el mismo volumen, y en ese caso, el más denso pesa más.

La densidad de un cuerpo o sustancia se representa por la letra ρ (ro, del alfabeto griego) y se define como la masa por cada unidad de volumen.

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

Para determinar la densidad basta con obtener el cociente de la masa entre el volumen del cuerpo.

Esta expresión matemática establece que si se mantiene constante el valor del volumen (V), la densidad del cuerpo varía de manera directa con su masa (m). Así, por ejemplo, si en un recipiente cerrado, de paredes rígidas (volumen constante), se introducen cada vez más moléculas de aire (más masa), se tendrá una densidad cada vez mayor para ese aire encerrado. Si lo que se mantiene constante es la masa, entonces, la densidad varía de manera inversa con el volumen; esto es, para una masa fija, a mayor volumen menor densidad, y viceversa. Así, por ejemplo, en una jeringa se pueden tener 20 miligramos de aire (masa fija), teniendo este aire una densidad de 1.0 $^{kg}/_{m^3}$. Luego se puede obstruir la salida de la jeringa y jalar el émbolo, con lo cual el aire encerrado ocuparía un volumen mayor (con la misma masa), con lo cual disminuirá su densidad.

En el Sistema Internacional de Unidades la densidad se mide en $^{kg}/_{m^3}$; pero es frecuente encontrarla expresada en $^{g}/_{m^3}$ ($^{g}/_{ml}$); cada $^{g}/_{cm^3}$ equivale a 1 000 $^{kg}/_{m^3}$. La densidad del agua es de 1 000 $^{kg}/_{m^3}$, a 4 °C; y la del aire es de 1.29 $^{kg}/_{m^3}$, a 0 °C. Estos valores fueron medidos a nivel del mar.

Presión: relación fuerza y área; presión en fluidos. Principio de Pascal

Desde hace siglos, los procesos y fenómenos relacionados con los líquidos y gases han sido objeto de estudio; desde luego se ha centrado la atención en el agua y el aire, fluidos básicos para la vida y con los que el ser humano convive cotidianamente.

Gracias a estos estudios se puede comprender por qué flotan los barcos, a pesar de estar construidos con materiales más densos que el agua, o por qué las personas pesan menos al estar sumergidas en el agua; y también se puede entender por qué el agua de los ríos se mueve con más rapidez en las zonas donde el cauce es más angosto y lo hace más lentamente en las zonas en que el cauce es más ancho.

Además, a partir de esos estudios se han diseñado y elaborado diversos dispositivos tecnológicos de uso frecuente en el mundo actual; por ejemplo, los submarinos y los batiscafos, que permiten a grupos de personas permanecer bajo el agua durante tiempos prolongados, o los equipos para buceo autónomo que las personas emplean para realizar actividades bajo el agua, así como los aviones y helicópteros.

Para explicar cómo es que los aviones vuelan, se debe empezar por reconocer que el aire pesa. Nuestro planeta está cubierto por una capa de aire: la atmósfera, de manera que todo lo que está sobre la superficie terrestre está rodeado de aire, de ahí que las personas no se percatan del peso del mismo; es más, ni siquiera se piensa en que el aire pese.

Una manera de medir el peso del aire es con ayuda de una balanza graduada en décimas de gramo y dos jeringas de 60 cm^3. Éstas han de ser jeringas sin aguja y con la salida obstruida. Además, debe hacerse un orificio en el soporte del émbolo en el cual pueda introducirse un clavo para fijarlo, como puede verse en la figura 3-8.

Para realizar el experimento, se nivela en ceros la balanza. Se toma una de las jeringas, se le retira el tapón y se empuja el émbolo hasta el fondo, colocando nuevamente el tapón firmemente apretado, se jala el émbolo sin sacarlo y se coloca el clavo que impedirá que el émbolo regrese hacia adentro. Así se tendrá

Figura 3-8.
Peso del aire.

vacío en el interior de la jeringa y se coloca ésta sobre la balanza. Se repite la operación con la segunda jeringa y se nivela la balanza. Una vez nivelada, se toman las jeringas y se les retira el tapón (se oirá un chasquido). Al colocar los tapones y las jeringas sobre la balanza, se notará que hay un desequilibrio, ahora las jeringas pesan más porque están llenas de aire, el cual no tenían al momento de nivelar la balanza.

Al nivelar nuevamente la balanza, se puede ver que el aire en las dos jeringas tiene una masa de poco más de un décimo de gramo (de hecho, en la Ciudad de México el aire tiene una densidad un poco mayor a un gramo por litro).

De manera que el aire pesa sobre todos los cuerpos en la superficie terrestre, sin embargo, los organismos están adaptados a vivir con esta presión, la presión atmosférica.

Hablar de presión es hablar de aplicar una fuerza sobre la superficie de un cuerpo. Se aplica presión sobre las teclas de un teclado de computadora al escribir, se aplica presión sobre el colchón de la cama cuando una persona se sienta o se acuesta en ella; se aplica presión sobre el suelo al estar de pie; también se aplica presión sobre el líquido contenido en una jeringa al empujar el émbolo.

Igual que para otras cantidades físicas, la presión tiene una expresión matemática.

Suponga que se tiene un bloque de hule espuma, del que se usa para elaborar cojines. Se dispone también de dos o tres tabiques. Se coloca el hule espuma sobre una mesa, y sobre él un tabique, de forma horizontal; el hule espuma se hundirá debido a la fuerza aplicada sobre él; la fuerza, en este caso, es el peso del tabique. Éste es un ejemplo evidente de presión sobre un cuerpo. El tabique está ejerciendo una fuerza sobre el hule espuma, y la presión se manifiesta en el hundimiento de éste. Evidentemente, si se colocan más tabiques uno sobre el otro, el hundimiento será cada vez mayor debido a que la presión sobre el hule espuma aumenta al aumentar la fuerza aplicada sobre él, es decir, la presión es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

Representando a la presión con P y a la fuerza con F, esto se escribe así:

$$P \propto F$$

Si un solo tabique se coloca de canto sobre el hule espuma, descansando sobre un área menor, el hundimiento del hule espuma será mayor respecto al caso anterior y la fuerza aplicada es la misma. Finalmente, se coloca el tabique en posición vertical, observándose un hundimiento mayor aún, ya que, siendo la misma fuerza aplicada, ahora actúa sobre un área más pequeña. De manera que cuando la misma fuerza se ejerce sobre un área grande, la presión es pequeña

Figura 3-9. Representación de la presión.

y cuando se ejerce sobre un área pequeña, la presión es grande. Esto es, la presión varía de manera inversa con el área.

Denotando con A el área, esto se escribe

$$P \propto \frac{1}{A}$$

La presión varía de manera directa con la fuerza aplicada y de manera inversa con el área sobre la que se ejerce. Esto es,

$$P \propto \frac{F}{A}, \quad P = k\frac{F}{A}$$

En el Sistema Internacional de Unidades, $k = 1$, por lo tanto, la expresión matemática para la presión:

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

La fuerza se mide en newtons (N) y el área en metros cuadrados (m^2), así que las unidades de presión estarán dadas N/m^2, o en pascales (Pa), y

$$1\ \text{Pa} = 1\ \text{N}/\text{m}^2$$

La fuerza que genera presión sobre un cuerpo es aquella que actúa en la dirección perpendicular a la superficie del mismo.

Actividad

Es posible calcular la presión que ejerce un caballo de 500 kg sobre el suelo, cuyas cuatro patas tienen herraduras con un área aproximada de 17.5 cm^2 cada una, de la siguiente manera.

$$F = \text{Peso} = mg = (500\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 4900\ \text{N}$$
$$A = \text{Área total} = (4)(17.5\ \text{cm}^2) = 70\ \text{cm}^2 = 70 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{4900\ \text{N}}{70 \times 10^{-4}\ \text{m}^2} = 70 \times 10^4\ \text{Pa} = 70 \times 10^5\ \text{Pa}$$

Ahora la presión que ejerce sobre el suelo un elefante de 3.0 toneladas, cuyas cuatro patas tienen un área aproximada de 147 cm^2 cada una de ellas será:

$$F = \text{Peso} = mg = (3\times10^3\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 29.4\times10^3\ \text{N}$$
$$A = \text{Área total} = (4)(147\ \text{cm}^2) = 588\ \text{cm}^2 = 588\times10^{-4}\,\text{m}^2$$

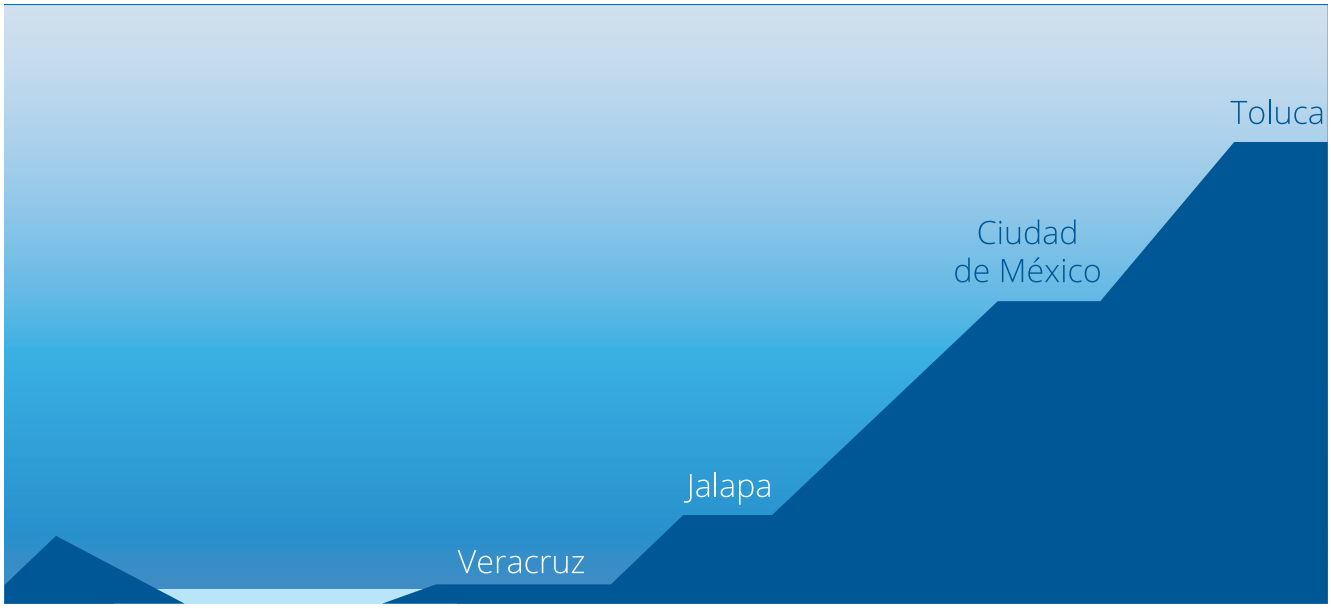
$$P = \frac{F}{A} = \frac{29.4\times10^3\text{N}}{588\times10^{-4}\,\text{m}^2} = \frac{29.4\times10^3\text{N}}{5.88\times10^{-2}\,\text{m}^2} = 5\times10^5\,\text{Pa}$$

Note que aunque el caballo pesa menos que el elefante, la presión que ejerce es mayor que la del elefante debido a la diferencia del área de sus huellas.

La presión atmosférica no es la misma en todos los lugares del planeta y, para visualizar esto, basta con reconocer que todo cuerpo sumergido en un líquido se encuentra sometido a la presión que éste ejerce sobre él y que esa presión es mayor si la profundidad es grande. De manera análoga, los cuerpos inmersos en este "océano de aire" están sometidos a la presión que ejerce sobre ellos y esa presión es mayor cuando la profundidad es mayor.

En términos generales, el "océano de aire" tiene su mayor profundidad a nivel del mar y en los lugares que están arriba de ese nivel, el "océano de aire" es menos profundo, como en las montañas. Por ejemplo, la presión atmosférica en Jalapa es menor que en el puerto de Veracruz, pero en la Ciudad de México es menor que en Jalapa, y en Toluca es aún menor, ya que al pasar de Jalapa a la Ciudad de México y luego a Toluca, se va a lugares cada vez más altos sobre el nivel del mar (figura 3-10).

Figura 3-10. Altura de diferentes ciudades.



Presión hidrostática y principio de Pascal

Como se mencionó, la presión dentro de un fluido en reposo depende de la profundidad *h* y de la densidad del fluido; parece razonable pensar que la presión hidrostática no sería la misma, aún estando a la misma profundidad, en agua que en mercurio, por ejemplo. Se puede realizar un experimento para obtener la relación entre estas variables, y así tener un modelo matemático para la presión hidrostática en función de la profundidad del fluido.

Figura 3-11.
Experimento de presión hidrostática.

Considere un estanque de profundidad *h* lleno de agua y una pequeña área *A*, circular en el fondo, ésta será la base de una columna cilíndrica de agua, cuya altura es *h*.

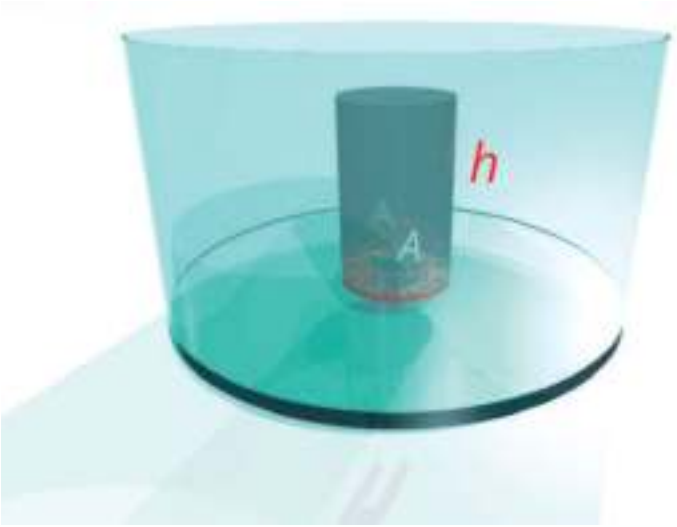


Figura 3-12.
Presión hidrostática.

De acuerdo con la definición, la presión que esta columna de agua ejerce sobre el área circular será:

$$P = \frac{\text{Peso de la columna de agua}}{\text{Área}} = \frac{m_a g}{A} = \frac{\rho V_a}{A} g$$

ya que $m_a = \rho V_a$. Donde m_a es la masa de la columna de agua, A el área de su base, ρ la densidad del agua y V_a el volumen de la columna.

Como $V_a = Ah$,

$$P = \frac{\rho A h g}{A} = \rho g h$$

Y ésta es la expresión matemática para la presión hidrostática, que es la presión que el agua ejerce a la profundidad h.

Sin embargo, para obtener la presión total a la que se encuentra sometido un cuerpo sumergido en un líquido, se debe considerar la presión atmosférica.

Actividad

Para realizar esta actividad, utilice una jeringa de 60 cm^3 con tapón, un globo que quepa holgadamente en ella y agua.

Extraiga totalmente el émbolo de la jeringa, cuidando que el tapón esté apretado, introduzca el globo en la jeringa y coloque el émbolo sin introducirlo.

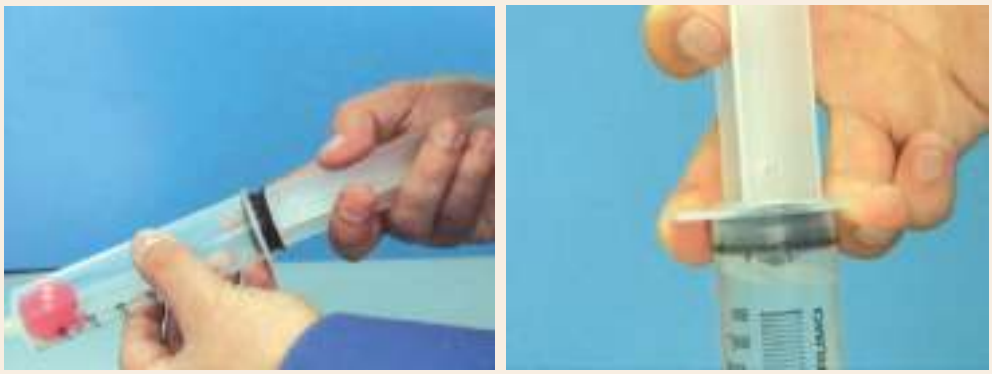


Figura 3-13.
Compresión de aire.

Al empujar el émbolo, el aire se comprime y el volumen del globo se reduce, conservando su forma. Esto ocurre porque la presión se transmitió tanto al aire dentro de la jeringa como al globo. Además, el globo conservó su forma, ya que la presión actuó sobre su superficie de forma perpendicular a cada punto. Al sacar el émbolo regresándolo a su posición inicial, el globo recupera su volumen.

Ahora se extrae totalmente el émbolo de la jeringa, se coloca el tapón y se introduce en ella el globo colocándole encima un pequeño lastre de

plomo (u otro material pesado), se llena totalmente de agua la jeringa y se le coloca el émbolo, igual que antes. Al empujar el émbolo se observa nuevamente que el volumen del globo se reduce, conservando su forma. De esto se concluye que la presión ejercida se transmitió al agua y al globo, comprimiendo el aire dentro de él.

Ahora a la jeringa se le extrae totalmente el émbolo y se le retira un poco de agua (aproximadamente la mitad), para luego colocarle el émbolo igual que antes.

Figura 3-14.
Principio de Pascal.

Esta vez se tiene dentro de la jeringa agua, y sobre ella aire; además, dentro del agua está el globo mantenido en el fondo con el lastre y se va a empujar el émbolo. ¿Qué le pasará al globo al empujar el émbolo en la jeringa?, ¿se logrará introducir el émbolo?

Al empujar el émbolo se observa que éste se introduce parcialmente y el globo, otra vez, se ve reducido en su volumen, conservando su forma. De aquí se concluye que la presión ejercida se transmitió al aire y del aire al agua y después al globo; también que la presión actuó sobre el globo de manera perpendicular en cada punto de su superficie, pues conservó su forma. Se observa también que al dejar de ejercer presión sobre el émbolo, éste regresa a su posición inicial y el globo recupera su volumen.

Estos experimentos y los resultados observados contribuyen a la comprensión del enunciado del *principio de Pascal*: "La presión ejercida sobre un fluido encerrado en un recipiente se transmite íntegramente a todo ese fluido y a las paredes del recipiente que lo contiene". Se puede agregar que la presión actúa en todas direcciones. Éste es el principio con el que funcionan las prensas hidráulicas y fue establecido por Blaise Pascal (1623-1662).

Por lo anterior, y en particular por los resultados del último experimento, queda claro que si una persona se sumerge hasta cierta profundidad en el agua, le afectarán la presión hidrostática y también la presión atmosférica del lugar donde se encuentre. De hecho, existe el concepto de presión total o absoluta, que se define como:

Presión absoluta = presión hidrostática + presión atmosférica.

Figura 3-15.
Blaise Pascal.

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

Al término *pgh* de esta expresión también se le conoce como *presión manométrica* y es la que se mide con un *manómetro,* aquel instrumento con el que se mide la presión del aire en las llantas de un automóvil, o también el *baumanómetro*, con el que se mide la presión arterial de una persona. Como se mencionó, la presión atmosférica en un lugar depende de su altura sobre el nivel del mar, ésta se mide con un *barómetro*. Evangelista Torricelli (1608-1647) realizó el descubrimiento del principio por el cual funciona el barómetro realizando el siguiente experimento con un tubo cilíndrico de vidrio de aproximadamente un metro, cerrado en uno de sus extremos y lleno totalmente de mercurio. Tapando el extremo abierto, se le gira de manera que éste quede hacia abajo y se introduce en un recipiente con mercurio. Luego se destapa el extremo abierto del tubo permitiendo que el mercurio se mezcle con el del recipiente. Pronto se observa que el mercurio deja de salir y la altura del mercurio dentro del tubo se estabiliza.

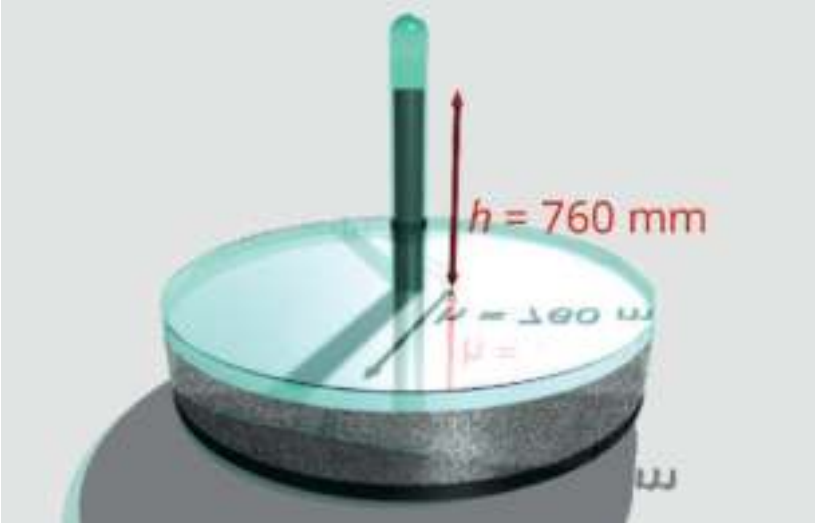


Figura 3-16.
Barómetro de mercurio.

La columna de mercurio deja de bajar en el momento en que la presión atmosférica (que está actuando sobre la superficie del mercurio en el recipiente) se equilibra con la que ejerce la columna de mercurio sobre un área igual a la sección del tubo. Como la presión dentro del tubo, arriba de la columna de mercurio, es prácticamente cero, la altura de la columna sobre el nivel del mercurio en el recipiente indica la presión atmosférica. Cuando el experimento se realiza a nivel del mar, la altura de la columna de mercurio es de 76 cm, y por ello se dice que la presión atmosférica a nivel del mar es de 760 mm de mercurio. Cabe destacar que también en el siglo XVII, el francés Blaise Pascal reforzó la propuesta de Torricelli para medir la presión atmosférica a partir de la altura de la columna de mercurio, realizando mediciones barométricas en lugares con diferentes alturas.

A cada milímetro de mercurio en el tubo se le denomina un torr, en honor a Torricelli; y también se le considera una unidad para la presión, de manera que es válido decir que la presión atmosférica a nivel del mar tiene un valor de 760 torr.

Puede calcularse la magnitud de la presión atmosférica en pascales, y se puede empezar por calcular su valor a nivel del mar. Esto se puede hacer con los datos del experimento de Torricelli y con ayuda del modelo matemático para la presión hidrostática.

Debe tenerse presente el valor de la densidad del mercurio, que es 13.6 g/cm^3 (o 13.6×10^3 kg/m^3).

La presión hidrostática ejercida por la columna de mercurio a nivel del mar es:

$$\begin{aligned} P_h &= \rho g h \\ &= (13.6\times10^3\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(0.76\ \text{m}) \\ &= 101.3\times103\ \text{N/m}^2 = 1.013\times10^5\ \text{Pa.} \end{aligned}$$

Y éste es el valor, en pascales, de la presión atmosférica a nivel del mar.

Al valor de la presión atmosférica a nivel del mar se le conoce también como una atmósfera (1 Atm); de manera que se tienen las siguientes equivalencias.

$$1\ \text{Atm} = 1.013\times10^5\,\text{Pa} = 760\ \text{mm Hg.}$$

Es de mencionar que el barómetro es un instrumento indispensable en los trabajos de meteorología; y que en ese campo de actividades a la presión atmosférica se le mide en barios y milibarios. Un bario equivale a 1×10^5 Pa.

¿Podría una persona sumergirse a cinco metros de profundidad en el agua y respirar a través de un tubo de cinco centímetros de diámetro?

Se puede calcular la fuerza que actuaría sobre la caja torácica de la persona sumergida, considerando que el área de su caja torácica sea de aproximadamente 0.35 m^2 y que la densidad del agua de mar es de 1.03×10^3 kg/m^3.

La presión absoluta sobre esta persona será:

$$
\begin{aligned}
P_a &= P_0 + \rho g h \\
&= P_0 + (1.03\times10^3\ \text{kg/m}^2)(9.8\ \text{m/s}^2)(5\ \text{m}) = P_0\ 50.47\times10^3\,\text{Pa} \\
&= 1.013\times10^5\ \text{Pa} + 0.5047\times10^5\,\text{Pa} \\
&= 1.5177\times10^5\ \text{Pa.}
\end{aligned}
$$

Ahora, como se expuso:

$$
\begin{aligned}
P &= \frac{F}{A} \\
F &= PA \\
&= (1.5177\times10^5\,\text{N/m}^2)(0.35\ \text{m}^2) \\
&= 0.53\times10^5\,\text{N} = 53\,000\ \text{N}
\end{aligned}
$$

Ésta es la magnitud de la fuerza ejercida sobre la caja torácica de la persona sumergida a cinco metros de profundidad en el mar, en este caso tanto la presión como la fuerza sobre la caja torácica están incrementadas aproximadamente un 50%; situación que impediría a la persona poder respirar, ya que es una situación equivalente a soportar un peso de más de 5 000 kg. Los buzos pueden respirar en estas condiciones gracias a que tienen aire a alta presión en sus tanques. La presión a la que se encuentra sometido un buzo al descender a 17 m de profundidad en el mar sería:

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

Donde:

$$
\begin{aligned}
P_0 &= 1.013\times10^5\,\text{Pa} \\
\rho &= 1.03\times10^3\ \text{kg/m}^3 \\
g &= 9.8\ \text{m/s}^2 \\
h &= 17\ \text{m}
\end{aligned}
$$

Entonces

$$
\begin{aligned}
P_a &= 1.013\times10^5\ \text{Pa} + (1.03\times10^3\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(17\ \text{m}) \\
&= 1.013\times10^5\ \text{Pa} + 1.716\times10^5\ \text{Pa} \\
&= 2.729\times10^5\ \text{Pa}
\end{aligned}
$$

Si en el experimento de Torricelli se usara agua en lugar de mercurio, ¿qué altura alcanzaría la columna de agua, estando a nivel del mar?

$$P_h = \rho g h$$

con

$$\rho = 1.013 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$
$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$
$$P_h = 1 \text{ Atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

entonces

$$h = \frac{P_h}{\rho g} = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{(1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)}$$
$$= \frac{101.3 \times 103 \text{ N/m}^2}{10.09 \times 103 \text{ N/m}^3}$$
$$= 10.04 \text{ m}$$

De modo que no sería práctico emplear agua para el barómetro de Torrichelli, ya que se necesitaría un tubo demasiado largo. También, con este resultado, podemos concluir que aproximadamente cada diez metros de profundidad en el mar, la presión se incrementa en una atmósfera.

Ahora bien, cuando los buzos deciden que es tiempo de ascender a la superficie, han de hacerlo lentamente o por etapas, para dar oportunidad a que las moléculas de oxígeno y de nitrógeno sean absorbidas por la sangre de su cuerpo. Si el ascenso lo hicieran rápidamente, esas moléculas darían lugar a la formación de burbujas que irían creciendo al ascender rápidamente, pues estaría pasando de zonas de alta presión (lugares profundos) a zonas de baja presión (lugares cada vez menos profundos), y esas burbujas en los vasos sanguíneos podrían causarles embolias, probablemente fatales.

Principio de Arquímedes

Se puede observar que los cuerpos menos densos que el agua flotan en ella y que los más densos se hunden. ¿Cómo entonces se podría explicar el que los barcos floten en el agua, a pesar de estar construidos con materiales más densos que ella? La respuesta se fundamenta en el principio de Arquímedes (287-212 a. C.), el cual establece que todo cuerpo sumergido, parcial o totalmente, en agua, experimenta un empuje vertical hacia arriba.

Se puede llegar a la expresión matemática de este principio considerando un estanque con agua, y dentro de él un objeto cilíndrico, parecido a una lata de atún, en posición horizontal.

Figura 3-17. Arquímedes.

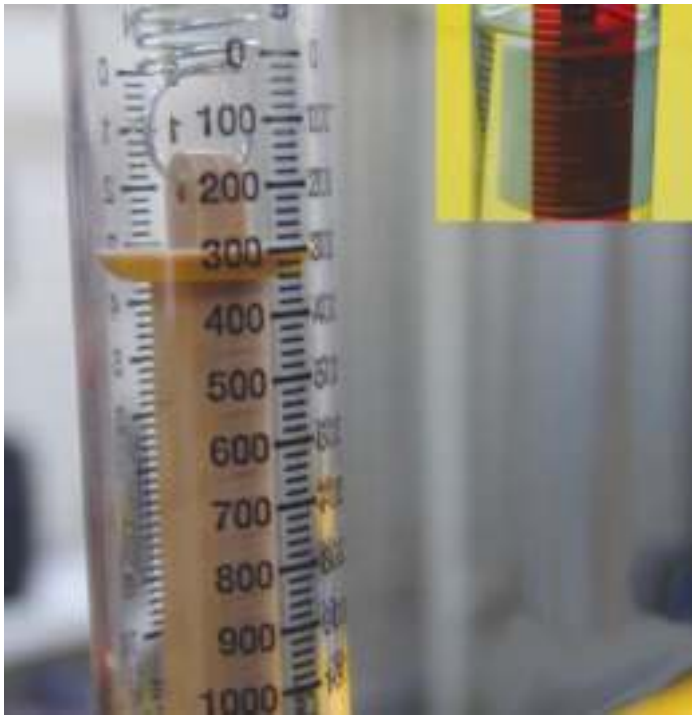


Figura 3-18.
Principio de Arquímedes.

La cara inferior del cilindro se encuentra a una profundidad h_i; en tanto que su cara superior está a una profundidad h_s.

La presión absoluta sobre la cara superior, P_s, del cilindro será:

$$P_s = P_0 + \rho g h_s$$

Y la presión absoluta sobre la cara inferior, P_i:

$$P_i = P_0 + \rho g h_i$$

Dado que h_i es mayor que h_s, se tiene que P_i es mayor que P_s, y habrá una diferencia de presiones ($P_i - P_s$).

$$\begin{aligned} P_i - P_s &= (P_0 + \rho g h_i) - (P_0 + \rho g h_s) \\ &= \rho g h_i - \rho g h_s \\ &= \rho g (h_i - h_s) \end{aligned}$$

Esta diferencia de presiones da lugar a una fuerza (un empuje) vertical hacia arriba, cuya magnitud es:

$$F = (P_i - P_s) A$$

Donde A es el área de la base del cilindro. Entonces, la fuerza vertical hacia arriba será:

$$F = \rho g (h_i - h_s) A$$

Pero $(h_i - h_s)\, A = V$ es el volumen del cilindro, que es, al mismo tiempo, el volumen del agua desplazada por él. Entonces:

$$F = \rho V g$$

Dado que ρ es la densidad del agua, y V el volumen del agua desplazada, entonces se tiene que el producto ρ por V representa la masa del agua desplazada, m_{ad}, por el objeto sumergido; entonces:

$$F = m_{ad} g$$

Esto es, la fuerza o el empuje hacia arriba que experimenta el cuerpo sumergido en el agua, corresponde al peso del agua desplazada por él, esto es precisamente lo que establece el principio de Arquímedes, este principio es válido también para cualquier otro fluido, no sólo para el agua.

Ahora, volviendo a la pregunta inicial de cómo es que los barcos pueden flotar en el agua, a pesar de estar construidos con materiales más densos que ella, ya se cuenta con los elementos necesarios para responder: el empuje hacia arriba que experimenta el barco impide que el barco se hunda.

Un sencillo experimento permite verificar que el *principio de Arquímedes* explica la flotación de los barcos. Los materiales son: un pedazo de plastilina, un recipiente transparente con boca ancha de un litro de capacidad, un plumón y agua.

Se vierte agua en el recipiente, hasta dos o tres centímetros debajo de su borde y se marca el nivel del agua. Se moldea con la plastilina un plato hondo o "lancha", que quepa en el recipiente.

Se coloca, suavemente, la plastilina moldeada sobre el agua, de manera que flote. Se marca el nuevo nivel del agua.

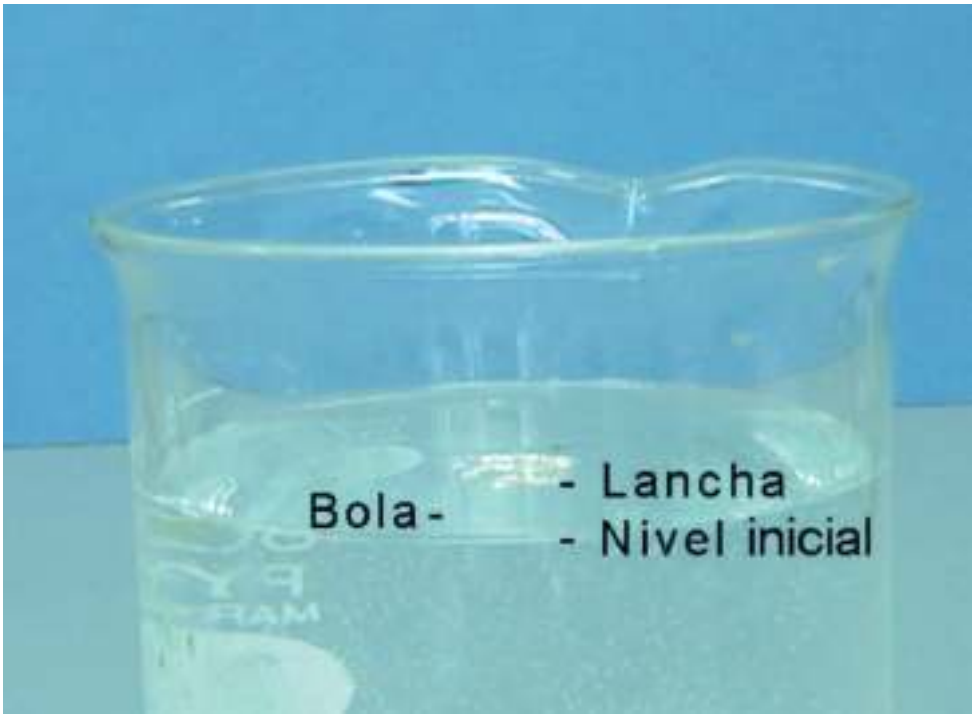


Figura 3-19.
Líquido desplazado.

La diferencia entre las dos marcas indica el volumen de agua desplazada por la plastilina. Ya se sabe, por el *principio de Arquímedes*, que ésta recibe un empuje vertical hacia arriba, cuya magnitud es igual a lo que pese el volumen del agua desplazada. La plastilina se encuentra en reposo debido a que hay dos fuerzas verticales contrarias actuando sobre ella; su peso hacia abajo y el empuje hacia arriba, del que nos habla el *principio de Arquímedes*; estas dos fuerzas ejercidas sobre la plastilina están equilibradas, es decir, son de igual magnitud y actúan en sentidos opuestos.

Ahora se retira la plastilina del agua. El agua en el recipiente regresará al nivel original, se hace una bola con la plastilina y se deposita en el agua, donde se

hundirá. El agua sube de nivel y se marca éste con el plumón junto a las dos marcas anteriores.

Se observa que el volumen de agua desplazada por la plastilina, en este caso, es menor que el volumen de agua desplazada cuando la misma cantidad de plastilina tenía forma de plato. Así que ahora, el empuje es menor que cuando la plastilina tenía forma de plato.

En el segundo caso, también actúan dos fuerzas verticales contrarias sobre la plastilina: su peso hacia abajo y el empuje hacia arriba (por el *principio de Arquímedes*). El peso de la plastilina es el mismo que en el caso anterior, pues la cantidad de plastilina es la misma, pero ahora el empuje hacia arriba es menor y por ello hay un desequilibrio de fuerzas, el peso es de mayor magnitud y la bola de plastilina se va al fondo del recipiente.

Entonces, los barcos están construidos con materiales más densos que el agua, pero su forma es tal que al estar sobre la superficie desplazan un gran volumen de agua, por lo que reciben un empuje hacia arriba que equilibra el peso del barco y lo hace flotar, al igual que el primer caso del experimento anterior. Aun al hundirse parcial o totalmente en un líquido, los cuerpos pesan menos, sensación que prácticamente todos hemos experimentado al estar dentro del agua. En este caso, el peso de los objetos dentro del agua (que algunos autores prefieren llamar peso relativo o aparente) es simplemente:

$$P_{\text{rel}} = P - F_{\text{flot}}$$

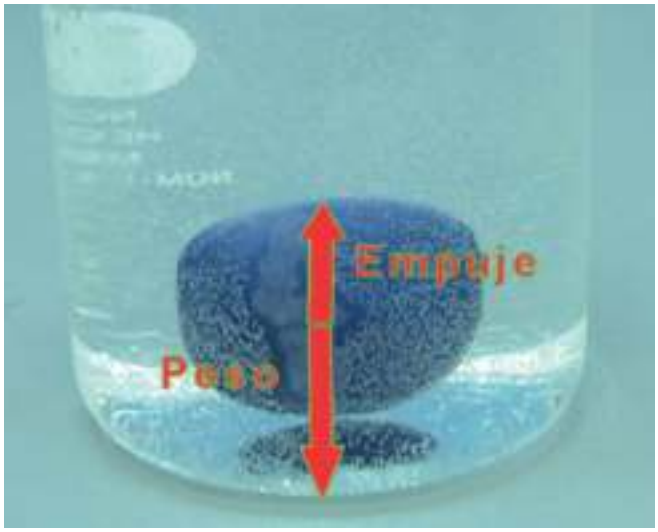


Figura 3-20.
Esquema de fuerzas.

Donde P es el peso del cuerpo fuera del agua. Y la fuerza de flotación F_{flot}, según el *principio de Arquímedes*, es igual, en magnitud, al peso del agua desplazada.

$$F_{\text{flot}} = m_{\text{ad}}g = \rho V_{\text{ad}}g$$

Donde ρ es la densidad del agua y V_{ad} es el volumen de agua desplazada.

Considere un estanque con agua y un cuerpo de masa m totalmente sumergido. Sobre el cuerpo actúan dos fuerzas verticales: su peso P hacia abajo y el empuje F_{flot} hacia arriba.

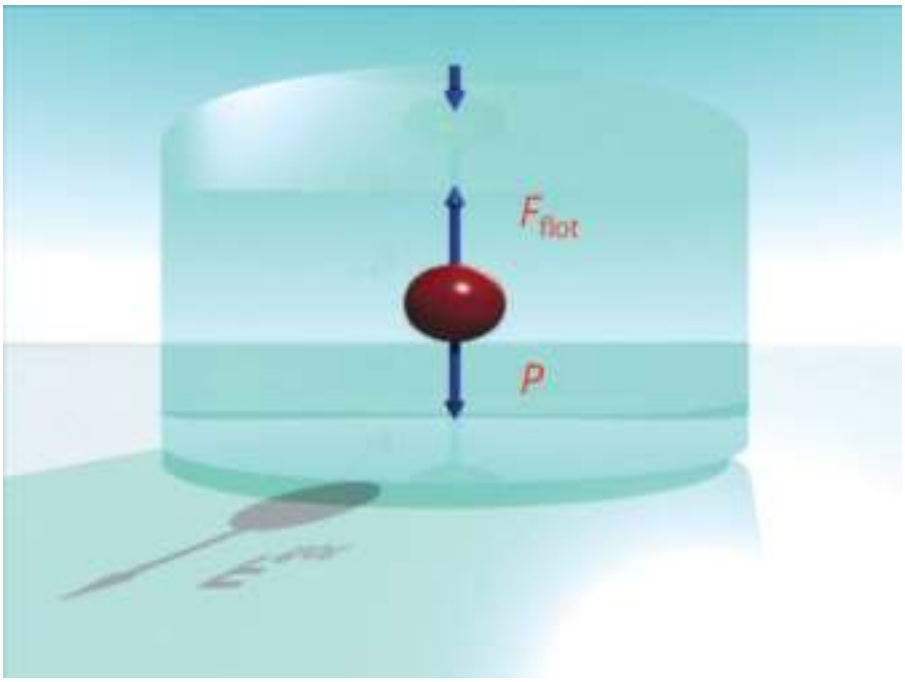


Figura 3-21. Esquema de fuerzas de flotación.

A la fuerza resultante se le denomina peso relativo, P_{rel}:

$$P_{rel} = P - F_{flot}$$

Pero la fuerza de flotación es igual al peso del volumen del agua desplazada.

$$\begin{aligned} F_{flot} &= m_{ad} g \\ &= \rho V g \end{aligned}$$

donde ρ es la densidad del agua y V es el volumen de agua desplazada (e igual al volumen del objeto sumergido).

El peso del objeto, fuera del agua es:

$$P = mg = \rho_0 V g$$

Donde ρ_0 es la densidad del objeto y V es el volumen del mismo.

Entonces,

$$P_{rel} = \rho_0 V g - \rho V g = (\rho_0 - \rho) V g$$

De ahí que

$$P_{rel} = (\rho_0 - \rho)Vg$$

De aquí puede verse que:

Si $\rho_0 > \rho$ entonces, $P_{rel} > 0$, el objeto se hunde.
Si $\rho_0 < \rho$ entonces, $P_{rel} < 0$, el objeto sube a la superficie del agua y flota.
Si $\rho_0 = \rho$ entonces, $P_{rel} = 0$, el objeto se queda en el punto en que se deja dentro del agua.

Los objetos construidos con materiales menos densos que el agua también pesan. ¿Por qué entonces si se colocan en el agua, se elevan hacia la superficie?

Esos objetos, inmersos en el agua, están sujetos a la acción de dos fuerzas: su peso y la fuerza de flotación. En este caso, la fuerza de flotación es de mayor magnitud que el peso del objeto y por eso el objeto sube a la superficie del agua y una vez ahí, flota; cuando esto sucede, su peso está equilibrado con la fuerza de flotación (figura 3-22).

Figura 3-22.
Equilibrio de fuerzas.

Usando un dinamómetro graduado en kilogramos se pesa una piedra de 24.2 kg, que al sumergirse en el agua su peso es 21.4 kg. ¿Cuál es el volumen de esta piedra?, ¿cuál es su densidad?

$$\begin{aligned} P &= (24.2\ \text{kg})g \\ P_{rel} &= (21.4\ \text{kg})g \\ \rho_{agua} &= 1\times10^3\ \text{kg/m}^3 \\ P_{rel} &= P - F_{flot} \\ F_{flot} &= P - P_{rel} \\ &= (24.2\ \text{kg})g - (21.4\ \text{kg})g \\ &= (2.8\ \text{kg})g \end{aligned}$$

Pero $F_{flot} = \rho_{agua}\, V g$, donde ρ_{agua}, es la densidad del agua y V el volumen de la piedra, que es igual al volumen del agua desplazada.

$$F_{flot} = \rho_{agua} V g = (2.8\ \text{kg})g$$

$$V = \frac{2.8\ \text{kg}}{\rho_{agua}} = \frac{2.8\ \text{kg}}{1\times10^3\ \dfrac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.8\times10^{-3}\,\text{m}^3$$

Que es el volumen de la piedra. Ahora, su densidad es:

$$\rho_{\text{piedra}} = \frac{m_{\text{piedra}}}{V}$$
$$\rho_{\text{piedra}} = \frac{24.2\ \text{kg}}{2.8\times10^{-3}\text{m}^3}$$
$$\rho_{\text{piedra}} = 8.64\times10^{3}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se calculará la densidad relativa de una pieza de hueso que pesa 39.2 g en aire y 18.7 g cuando está sumergida en agua.

$$m = 39.2\ \text{g} \qquad P = (39.2\times10^{-3}\ \text{kg})g$$
$$m_{\text{rel}} = 18.7\ \text{g} \qquad P_{\text{rel}} = (18.7\times10^{-3}\ \text{kg})g$$
$$\rho_{\text{agua}} = 1.0\ \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$P_{\text{rel}} = (\rho_{\text{o}} - \rho_{\text{agua}})\,V g$, donde ρ_{o} es la densidad del hueso y ρ_{agua}, es la densidad del agua.

$$\rho_{\text{rel}} = (\rho_{\text{o}} - \rho_{\text{agua}})Vg$$
$$P = \rho_{\text{o}}Vg$$
$$\frac{P_{\text{rel}}}{P} = 1 - \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{o}}}$$
$$\frac{18.7\times10^{-3}\ \text{kg})g}{(39.2\times10^{-3}\ \text{kg})g} = 1 - \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{o}}}$$
$$\frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{o}}} = 1 - \frac{18.7}{39.2} = \frac{39.2-18.7}{39.2} = \frac{20.5}{39.2} = 0.5229$$

Entonces la densidad relativa es

$$\frac{\rho_{\text{o}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{1}{0.5229} = 1.91$$

Gasto. Ecuación de continuidad

¿Por qué el agua de los ríos fluye con mayor velocidad en los lugares donde el cauce es más angosto, y lo hace lentamente en las zonas donde el cauce es más ancho?

Ciertamente, ése es el comportamiento del agua que se observa en los ríos; y para dar respuesta a esta pregunta se debe estudiar a los fluidos en movimiento, esto es, la hidrodinámica.

Un primer concepto a estudiar, dentro de esta rama de la física, es el concepto de gasto, que se denota con la letra Q y se define como el volumen de fluido por cada unidad de tiempo.

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

Sus unidades son $m^3/_S$, de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades, aunque se usan también algunas otras como $cm^3/_S$ o $litros/_{min}$, dependiendo del fenómeno en estudio.

En relación con este concepto, pueden surgir preguntas interesantes: ¿qué volumen de agua entra a la Ciudad de México cada segundo? O bien ¿cuánta sangre fluye por nuestro cuerpo en un segundo?

El abasto de agua a la Ciudad de México requiere un gasto de varias decenas de metros cúbicos por segundo, y el gasto cardiaco, en un hombre adulto en reposo, es de aproximadamente un litro de sangre cada 5 segundos (sumando todos los vasos sanguíneos).

Considere un flujo de agua laminar y continuo (un flujo suave y sin turbulencias) a través de tubos cilíndricos rígidos. Para comprender la relación entre la velocidad con que se desplaza el agua y el área transversal del tubo se hace el siguiente análisis.

El agua fluye a lo largo de un tubo cilíndrico que a partir de cierto punto cambia su diámetro a uno menor, como en la figura 3-23.

Se muestra en la figura el mismo volumen de agua en ambos puntos del tubo; esto es, en la parte ancha y en la angosta. Al ser iguales los volúmenes, el de menor área transversal tiene una mayor longitud.

Si se denomina V_1 al volumen de la parte ancha y V_2 al volumen de la parte angosta, se tendrá la siguiente igualdad:

$$V_1 = V_2$$

O bien

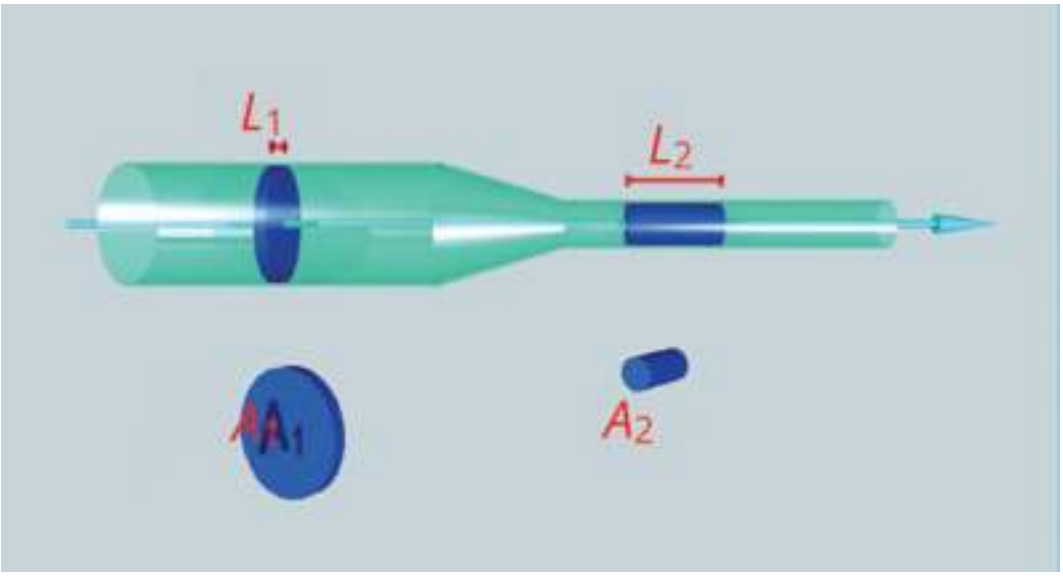


Figura 3-23. Tubo con reducción de diamétro.

$$A_1L_1 = A_2L_2$$

De donde,

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_2}{L_1}$$

Ahora, considerando que el gasto es constante, esto es, es el mismo en ambas partes del tubo, y teniendo en cuenta que V_1 es igual V_2, puede afirmarse que el tiempo que tarda el agua en recorrer L_1 es igual al tiempo que tarda en recorrer L_2, y recordando que la velocidad es:

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

Se tiene que

$$t = \frac{L_1}{v_1} = \frac{L_2}{v_2}$$

Donde V_1 y V_2 son los valores de las velocidades con que el agua se desplaza en las dos diferentes partes del tubo. De esta última expresión, se obtiene que:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Y, combinando esta ecuación con

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_2}{L_1}$$

se obtiene

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

De donde se tiene que

$$A_1v_1 = A_2v_2 = \text{cte.}$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de continuidad y relaciona la velocidad de un fluido incompresible dentro de un tubo cilíndrico con su área transversal; la ecuación plantea que el producto del área por la velocidad es igual en cualquier sección del tubo, esto es, si en una sección el área se reduce, entonces necesariamente la velocidad tiene que aumentar para que este

producto mantenga su valor y la igualdad se conserve. Esto significa que si el gasto es constante, entonces, donde se reduce el diámetro del tubo, debe aumentar la velocidad del fluido y viceversa.

La ecuación de continuidad de fluidos incompresibles en un flujo laminar y continuo a través de tubos cilíndricos rígidos, explica diversos fenómenos hidrodinámicos, como el flujo del agua en ríos o el de la sangre en el sistema cardiovascular.

Ejemplo

El gasto sanguíneo para una persona adulta en reposo es de 5.0 litros/min. Si la aorta tiene un diámetro de 2.4 cm, ¿cuánto vale la velocidad media de la sangre al pasar por esta arteria?

$$Q = 5\ \frac{\text{litros}}{\text{min}} = \frac{5000\ \text{cm}^3}{60\ \text{s}} = 83.3\ \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$
$$D = 2.4\ \text{cm}$$
$$r = 1.2\ \text{cm}$$
$$A = \pi r^2 = \pi(1.44\ \text{cm}^2) = 4.524\ \text{cm}^2$$
$$Q = vA$$
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{83.3\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{4.524\ \text{cm}^2} = 18.4\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Ejemplo

Por un tubo de 4 cm de diámetro pasa agua a una velocidad de 3 m/s. Este tubo se conecta a otro cuyo diámetro es de la mitad del primero. ¿Cuál será la velocidad del agua en el segundo tubo?

$$D_1 = 4.0\ \text{cm}$$
$$r_1 = 2.0\ \text{cm}$$
$$v_1 = 3.0\ \text{cm/s}$$
$$r_2 = 1.0\ \text{cm}$$
$$Q = v_1A_1 = v_2A_2$$
$$v_2 = \frac{v_1A_1}{A_2} = \frac{(3.0\ \text{cm/s})(4\pi\ \text{cm}^2)}{\pi\ \text{cm}^2} = 12\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Así, la velocidad del agua en el segundo tubo será de 12.0 cm/s.

Ecuación de Bernoulli. Tubo de Venturi

Figura 3-24.
Daniel Bernoulli.

Los aviones están construidos con materiales mucho más densos que el aire. ¿Cómo pueden volar? La respuesta a esta pregunta la da también la hidrodinámica, pero todavía no es posible responderla; antes se debe conocer y comprender la ecuación de Bernoulli.

Para poder elevarse, un avión debe adquirir cierta velocidad rodando en tierra.

En el siglo XVIII el científico suizo, Daniel Bernoulli (1700-1782), estudiando el flujo de agua a través de tubos cilíndricos rígidos, descubrió que la presión en las paredes laterales del tubo era menor cuando el agua se movía con mayor rapidez y mayor cuando el agua se movía más lentamente; esto ocurría también con los gases. Estos descubrimientos los incluyó en su obra "Hidrodinámica", publicada en 1738.

La *ecuación de continuidad* se refiere a un flujo continuo de agua y nos dice: "Dado que el gasto es constante, la rapidez del agua aumenta en los tramos en que el diámetro del tubo se reduce, y disminuye en los tramos en que el diámetro del tubo es mayor".

Con lo anterior se puede estudiar la relación entre la velocidad del fluido y la presión que éste ejerce sobre las paredes del tubo por el que se desplaza.

Aquí también se considerará que el flujo es suave y sin turbulencias (estacionario), y que el fluido es incompresible.

Considere agua fluyendo en un tubo que cambia de diámetro y de altura, como el de la figura 3.25a.

Se denomina región 1 a la parte ancha del tubo, y región 2 a la parte delgada. Los volúmenes de agua sombreados que pasan simultáneamente por ambas regiones son iguales.

Denotemos P_1 a la presión en la región 1 y P_2 a la presión en la región 2. Para que el volumen V del fluido avance de la región 1 a la región 2 es necesario que actúe una diferencia de presión $\Delta P = P_1 - P_2$ empujándolo; esto es, haciendo trabajo sobre él (figura 3-25b).

Así, el trabajo realizado por esta diferencia de presión es:

$$W = \Delta PV = (P_1 - P_2)V = P_1V - P_2V$$

Una parte de este trabajo se utiliza en cambiar la velocidad del agua (energía cinética) y la otra, en cambiar la altura (energía potencial gravitacional).

Si se denota con m a la masa de líquido de cada uno de los volúmenes sombreados, entonces el cambio en la energía cinética es

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

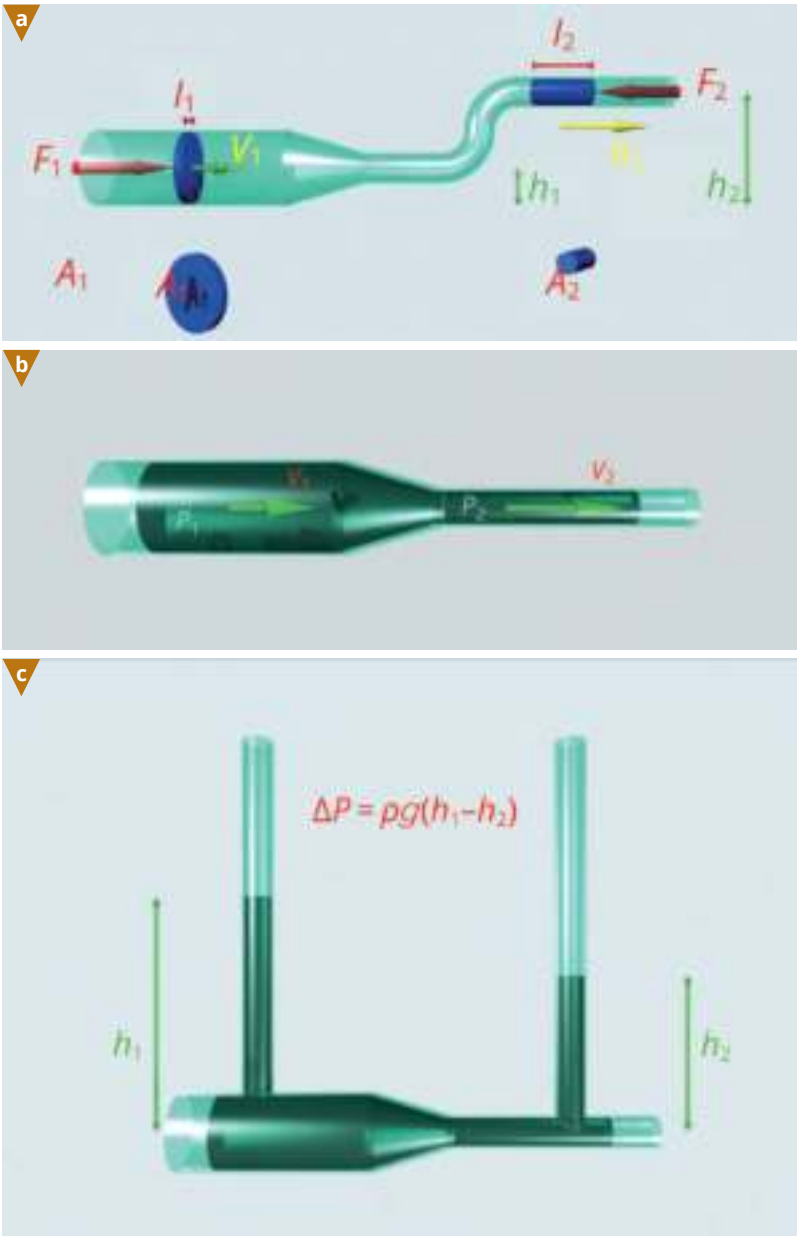


Figura 3-25.
a) Tubo con cambio de diámetro y altura.
b) Presiones y velocidades en un tubo horizontal con reducción de diámetro *W*.
c) Tubo de Venturi.

Y el cambio en la energía potencial gravitacional es

$$\Delta U = mgh_2 - mgh$$

Ahora, si se aplica el teorema de trabajo y energía ($W = \Delta E_c + \Delta U$), entonces

$$(P_1 - P_2)V = \frac{1}{2}m_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_2 - mgh_1$$

Recordemos que $\rho = m/V$ (donde ρ sería, en este caso, la densidad del agua); así que, dividiendo cada término entre V, la expresión anterior se reduce a:

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

Y, reordenando los términos

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

Y ésta es la *ecuación de Bernoulli* para el flujo estacionario de fluidos incompresibles, como el agua.

Esta ecuación también se puede expresar como:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{constante}$$

Esta ecuación dice que la suma de la presión más la energía cinética por unidad de volumen más la energía potencial por unidad de volumen, tiene el mismo valor en todos los puntos a lo largo de su recorrido.

Si el tubo se mantiene horizontal, $h_1 = h_2$, y la *ecuación de Bernoulli* se reduce a:

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

Esta expresión dice que si un fluido se desplaza dentro de un tubo horizontal y pasa de una región 1 a otra región 2, con diferente diámetro, si v_2 es mayor que

v_1, entonces necesariamente P_2 será menor que P_1 y viceversa, esto es: para un fluido en movimiento, donde la velocidad se incrementa, la presión disminuye y viceversa.

Este modelo matemático funciona también, con muy buena aproximación para el flujo de todo tipo de fluidos (incluidos los compresibles como los gases, el aire incluido) y también a través de tubos no rígidos, siempre que el flujo sea estacionario.

Un ejemplo de la aplicación de la *ecuación de Bernoulli* es el denominado tubo de Venturi, estudiado por el físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822).

Este tubo se ilustra en la figura 3-25c, y con él se pueden medir velocidades de un fluido incompresible, como el agua. Así, puede determinarse la velocidad del fluido por la región 2, si se conoce la diferencia de presiones $\Delta P = P_1 - P_2$ y las áreas transversales de las dos secciones. De acuerdo a las lecturas de los manómetros (medidores de presión) en la figura, $P_1 > P_2$, dado que $v_1 < v_2$. Así, para el tubo horizontal, la *ecuación de Bernoulli* será:

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

Pero, a partir de la ecuación de continuidad, $A_1 v_1 = A_2 v_2$, se tiene que

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

y, sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior, se obtiene

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 v_2^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$v_2 = A_1\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Así que, conociendo las secciones transversales del tubo, en ambas regiones, la diferencia de presiones ($P_1 - P_2$) y la densidad del fluido, se puede determinar la velocidad del fluido en la región 2. Aplicando este resultado y la *ecuación de continuidad*, se puede conocer la velocidad en la región 1.

Los aviones pueden volar, a pesar de estar construidos con materiales mucho más densos que el aire debido a la forma del ala, la cual está diseñada para mantener un flujo uniforme de aire (figura 3-26).

El aire, en la región superior del ala, recorre una distancia mayor que la que recorre por la parte inferior y esto pasa en el mismo tiempo, por lo tanto, la velocidad del aire en la región de arriba del ala es mayor que la del aire por debajo de ella. Debido a esta diferencia de velocidades, la presión del aire en la parte superior del ala es menor que la presión del aire en la parte inferior. Esta diferencia de presiones existe una fuerza neta hacia arriba, ésta es llamada la fuerza

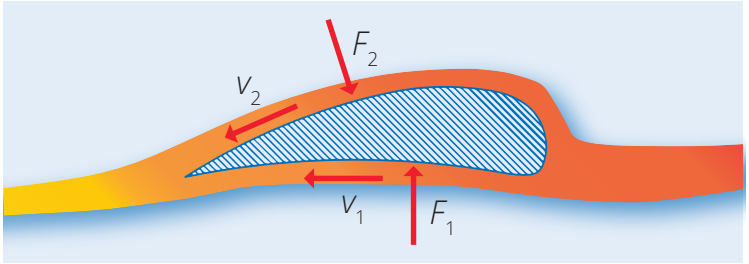


Figura 3-26.
Ala de un avión.

de sustentación, que actúa sobre cada ala. La sustentación del avión depende de su velocidad y del ángulo de las alas.

Es por lo anterior que los aviones, para poder elevarse, deben adquirir cierta velocidad y por lo que, una vez en movimiento, mantienen su vuelo.

Otras aplicaciones de la *ecuación de Bernoulli* son los atomizadores y las pistolas de aire para pintar (figura 3-27). La corriente de aire pasa perpendicularmente por un extremo del tubo, inmerso en el líquido. El paso de aire a alta velocidad reduce la presión arriba del tubo (ésta ahora es menor que la presión atmosférica) y esta disminución en la presión hace que el líquido suba hacia la corriente de aire, la que lo dispersa formando una nube de pequeñas gotas.

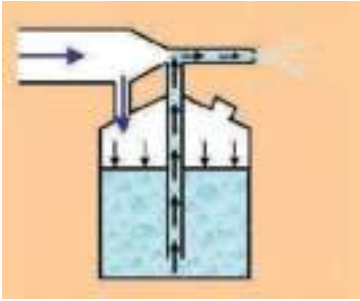


Figura 3-27.
Atomizador.

Al sostener dos hojas de papel en posición vertical y paralelas frente a la boca de una persona que sopla suavemente entre ellas, éstas tienden a juntarse, ¿por qué?

Al soplar entre las hojas, se tiene una zona de baja presión entre ellas y, por ello, la presión atmosférica presente en la parte externa las empuja hacia adentro, acercándolas una a la otra (figura 3-28).

Figura 3-28.
Presión de aire al cambiar su velocidad.

Ejemplo

Suponga que fluye agua a través de un tubo horizontal que tiene una reducción en su diámetro. La presión es 4.5×10^4 Pa en un punto en que la velocidad es de 2 $^{m}/_{s}$ y el área es A. La velocidad y la presión en un punto en que el área se reduce a $^{A}/_{4}$, se calcula como sigue:

$$A_1 = A,$$
$$P_1 = 4.5\times10^4 \text{ Pa},$$
$$v_1 = 2\ \frac{\text{m}}{\text{s}},$$
$$A_2 = \frac{A}{4},$$

la densidad del agua $\rho = 1\times10^3\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

De la *ecuación de continuidad* y la *ecuación de Bernoulli* se sabe que:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

sustituyendo

$$v_1 A_1 = v_2 \frac{A}{4}$$
$$v_2 = 4v_1 = 8.0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

y,

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 \\ &= P_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \\ &= P_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - 16v_1^2) \\ &= P_1 + \frac{1}{2}\rho(-15v_1^2) \\ &= P_1 - \frac{15}{2}\rho v_1^2 \end{aligned}$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - \frac{15}{2}\left(10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\left(2.0\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \\ &= P_1 - \frac{15}{2}\left(10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\left(4.0\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right) \\ &= P_1 - (30.0)\left(10^3 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}\right) \\ &= 4.5\times 10^4\,\text{Pa} - 3.0\times 10^4\,\text{Pa}, \end{aligned}$$

ya que

$$1\frac{\text{kg}}{\text{ms}^2} = 1\,\text{Pa}$$

Entonces,

$$P_2 = 1.5\times 10^4\,\text{Pa}$$

Temas de proyecto

¿Cómo funcionan los gatos hidráulicos?

El gato hidráulico es una herramienta de uso común en talleres mecánicos y vulcanizadoras. Estos gatos son indispensables para levantar los automóviles al cambiar alguna llanta averiada o al realizar alguna otra reparación.

Los gatos hidráulicos usan un fluido incompresible, aceite, que es impulsado a un cilindro mediante el émbolo de una bomba (otro cilindro de diámetro menor). En el proceso de bombeo, cuando el émbolo va hacia atrás, saca al aceite del depósito y cuando va hacia adelante lo empuja hacia el cilindro de mayor diámetro.

Desde el punto de vista físico, se tienen dos cilindros conectados, uno más pequeño y corto que el otro. Al aplicar una pequeña fuerza al cilindro menor, se ejerce una presión. De acuerdo con el *principio de Pascal*, esta presión se transmite íntegramente al área transversal del cilindro mayor, pero dado que éste tiene un área transversal mayor, la fuerza ejercida por el segundo cilindro será mayor. Es decir:

$$P_1 = P_2$$

entonces,

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

$$F_2 = F_1\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

Mientras mayor sea la diferencia de áreas de los cilindros, mayor será la fuerza en el cilindro más grande. Cabe hacer notar que en el uso de los gatos hidráulicos, al aplicar una fuerza al cilindro menor, generalmente interviene también otra herramienta usada desde la antigüedad: la palanca.

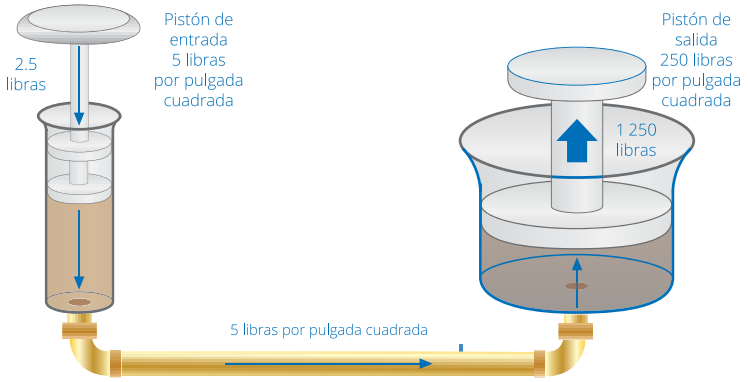


Figura 3-28.
Presión hidráulica.

Temperatura y sus escalas de medición

En las secciones siguientes se analizarán las leyes fundamentales de la termodinámica y sus aplicaciones a la vida cotidiana, en la que es frecuente preguntarse: ¿cómo protegerse del frío en invierno y del calor en verano?, ¿cómo disminuir el gasto de gas, leña y electricidad en casa? Y, más recientemente, ¿cómo disminuir drásticamente la contaminación para aproximarse más al desarrollo sustentable?

Desde luego, las tres preguntas anteriores no fueron formuladas así en los orígenes del desarrollo histórico de la termodinámica. La noción de desarrollo sustentable, por ejemplo, no era una preocupación generalizada como lo es ahora, cuando los límites del crecimiento poblacional y productivo así como su huella ambiental no eran problemas a corto plazo.

Algunos historiadores consideran que la termodinámica nació hace unos cuatro siglos, asociada a la resolución de problemas sociales prácticos; por un lado los conectados con la predicción del tiempo atmosférico, lo que llevó al entendimiento de las variaciones en el volumen de los gases al cambiar la presión y la temperatura; por otra parte, el uso generalizado de los motores térmicos a base de carbón mineral, lo cual hizo necesario entender las relaciones entre los conceptos de trabajo mecánico y calor.

Más adelante, el agotamiento de los yacimientos superficiales de carbón obligó a su extracción del subsuelo, con los consiguientes problemas de inundaciones en las minas, ocasionados por el encuentro con los mantos freáticos. Se presentó así, junto con la operación rentable de las minas, la necesidad de construir motores térmicos cada vez más eficientes en cuanto al gasto de carbón y la realización de trabajo.

Hoy en día, la extracción eficiente de combustibles fósiles como petróleo, gas y carbón, sigue siendo tan prioritaria como en aquellos tiempos, pero agravada por el agotamiento cercano de los dos primeros. Si a lo anterior se agregan los problemas evidentes para la salud y el ambiente ocasionados por su quemado o su utilización generalizada en múltiples actividades sociales, es inevitable tomar en cuenta el problema de la contaminación. Para reducirla, es imprescindible replantearse el uso de los combustibles fósiles, la electricidad y la leña en casa.

La termodinámica ayuda a enfrentar los problemas mencionados, que han sido una preocupación permanente desde la aparición de los motores térmicos. Asimismo, se mostrará que a partir de la formulación de los conceptos y leyes de la termodinámica es posible entender los aspectos básicos de nuestro mundo en cuanto a su funcionamiento energético.

La termodinámica es una parte importante de la física, que comprende el estudio de las transformaciones de energía por calor y por trabajo a través de los cambios de estado físico de un objeto macroscópico. Analiza también la forma en que los objetos se acercan al equilibrio, cuando inicialmente parten de un estado de desequilibrio. La *ley cero de la termodinámica* revela que la temperatura es una de las propiedades básicas de todo objeto o sistema termodinámico, que indica si un objeto está en equilibrio térmico con otro.

La *primera ley de la termodinámica* establece la existencia de la energía interna como una propiedad fundamental de todo sistema termodinámico y estipula la forma en que cambia esta energía al interactuar con otros cuerpos, ya sea por trabajo o por calor.

La *segunda ley de la termodinámica* se refiere a que los objetos tienen además otra propiedad, llamada *entropía*, la que siempre aumenta cuando un objeto aislado experimenta un cambio de estado, marcando de esta forma la dirección en que el proceso de transformación ocurre.

Nociones preliminares sobre temperatura, paredes adiabáticas y diatérmicas

Conductividad térmica

La sensación de "frío" o de "calor" se asocia al hecho de que la temperatura de nuestro cuerpo está por encima o por debajo de la temperatura del ambiente.

En un lugar donde nieva y el agua de los lagos, ríos y aun el mar se congela, se siente "frío" porque el cuerpo humano tiene una temperatura muy superior a la de los objetos que lo rodean. Esto mismo sucede en lugares de alta montaña en México, o en sitios ubicados a gran altura sobre el nivel del mar, en los meses de invierno.

Si la temperatura corporal es mayor que la del ambiente, entonces la energía del cuerpo tenderá a escapar, produciendo la sensación de "frío". ¿Qué se puede hacer para evitar que la energía escape al exterior por causa de esa diferencia de temperatura? La solución es cubrirse con ropas gruesas.

Durante el verano, a baja altura sobre el nivel del mar, lo más probable es que la temperatura del cuerpo llegue a ser menor que la del ambiente. Entonces se siente "calor", porque ahora la energía del cuerpo tiende a aumentar al absorberla del ambiente. ¿Qué se puede hacer para evitar esa molesta sensación? Se usan ropas delgadas. Y, si no basta, se usan abanicos para refrescarse.

La temperatura es un concepto que desempeña un papel clave en cuanto a modificar el ambiente para sentirlo confortable. Pero ¿qué es la temperatura? Se profundizará en lo que este concepto significa hasta llegar a su definición científica.

En la vida cotidiana, para no "tener frío" se usa "ropa caliente", se activa un calentador en el interior del cuarto o se le aísla con "lambrín" (un recubrimiento para las paredes hecho de madera, ya que es un buen aislante térmico).

Actividad

Envuelva una olla de agua con un sarape o un abrigo y sienta la temperatura del agua con uno de sus dedos, antes y después de cubrir la olla. ¿Qué

percibe con el dedo?, ¿se ha calentado el agua?, ¿se puede calentar una olla de agua envolviéndola con ropas, que a menudo se suelen calificar de "calientes"?

Si ahora se envuelve a la olla de agua con una cobija eléctrica y se sumerge uno de los dedos en el agua, ¿se percibiría alguna diferencia con lo planteado en el párrafo anterior?

Si se observa que la olla no se "calienta" envolviéndola con un sarape, ¿por qué las personas sí se "calientan" al cubrirse con sarapes o abrigos?

Entre la olla y las personas hay una gran diferencia, las personas están vivas y la olla no. El metabolismo hace que el cuerpo tome energía de los alimentos y parte de ella la irradia en forma de calor; usar ropa abrigadora impide que esta energía escape. Se puede consultar un libro de biología para ver las diferencias entre los llamados animales de sangre "caliente" y de sangre "fría".

No es que haya ropas "calientes" y frías", en el sentido de que al contacto con otro cuerpo en un caso lo "calienten" y en el otro lo "enfríen"; lo que sí sucede es que algunas ropas impiden más que otras la fuga de la energía del cuerpo.

Actividad

Caliente una olla con agua. ¿Cuándo se enfría más rápido el agua: cuando se rodea la olla con un abrigo o un sarape, cuando se la cubre con una delgada camiseta o cuando se la deja sin protección?

Actividad

El experimento se puede realizar mejor con tres ollas iguales llenas con la misma cantidad de agua caliente; una se envuelve con un sarape o un abrigo, otra con una camiseta y la tercera se deja a la intemperie. Si se revisa periódicamente el "enfriamiento" del agua de cada olla con el dedo: ¿qué se podría concluir?, ¿en qué olla el agua se "enfriaría" más rápido?

Quizá se detecte que el agua caliente se enfría menos rápidamente cuando se cubre con un sarape, que cuando se deja a la intemperie o se cubre con una camiseta. Este hecho es inequívoco cuando se utiliza el dedo como termómetro. Suponiendo que el dedo es un "buen termómetro", se concluye que la olla cubierta con el sarape tarda más en enfriarse que cuando se cubre con una

camiseta, y aún más que cuando se deja a la intemperie sin protección alguna. De aquí se concluye que se puede hablar de buenos y malos conductores de energía por calor para retrasar el enfriamiento de los cuerpos "calientes". A los materiales que impiden que la energía se pierda por calor, se les llama adiabáticos (aislantes térmicos) y a los materiales que lo permiten, se les denomina diatérmicos (conductores térmicos).

En el siguiente experimento (figura 3-29) se pegan clips con parafina en una barra de metal, calentando uno de los extremos con la flama de un mechero. ¿Qué se observa?

El experimento muestra que el metal es un buen conductor de energía por calor, mientras que el asbesto es un mal conductor. La **conductividad térmica** es una propiedad de los materiales que indica si se trata, comparativamente, de buenos o malos conductores. El valor de conductividad es muy bajo para los materiales adiabáticos, en cambio este valor es muy alto para los diatérmicos.

Como se observa en la figura 3-30, la escala vertical no es "lineal", en tanto que sí lo es la horizontal. De lo analizado hasta aquí, se tiene que una primera respuesta a la pregunta, ¿qué se puede hacer para protegerse del frío?, es cubrirse con materiales adiabáticos, como un sarape de lana grueso, o muchas prendas delgadas.

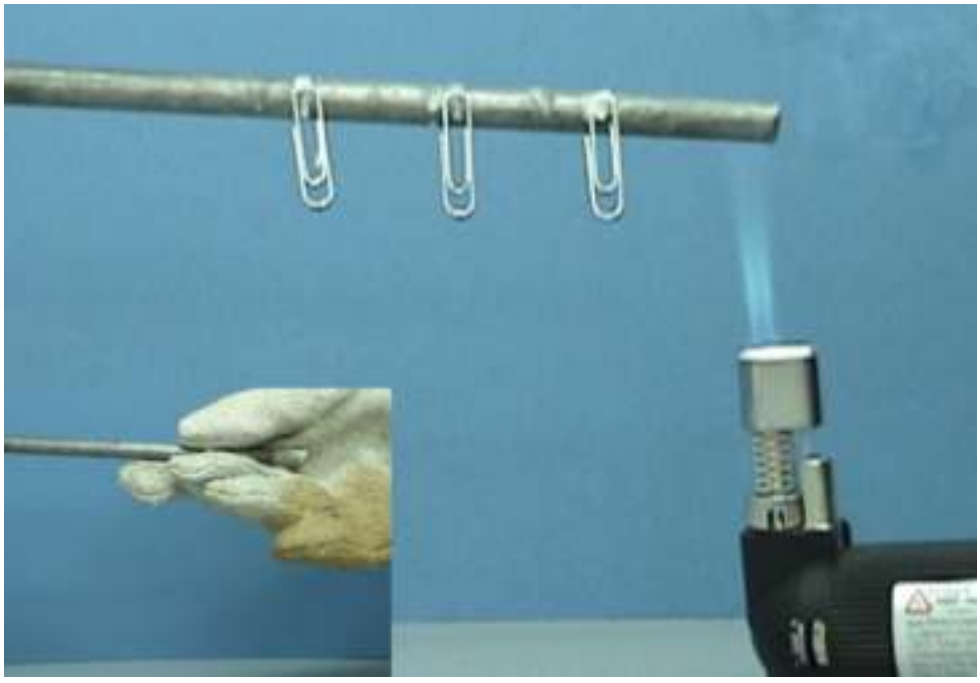


Figura 3-29. Conducción por calor en una barra de cobre y un guante para asbesto como aislante térmico.

Descripción microscópica

El metal es un buen conductor de energía por calor porque los electrones de sus átomos se hallan en un estado físico en el que se mueven con más libertad que, comparativamente, los electrones de los materiales que no son buenos conduc-

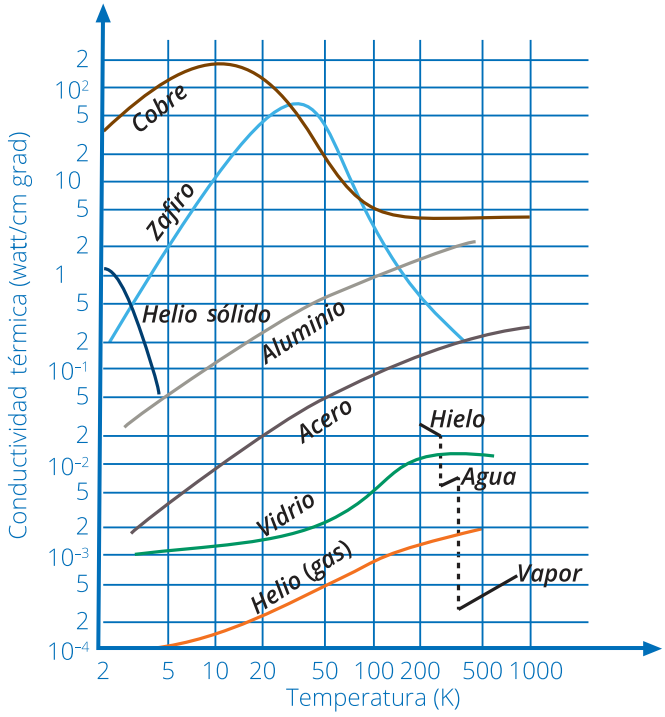


Figura 3-30. Conductividades térmicas de diferentes materiales.

tores como el asbesto o la madera. Así que cuando se calienta un extremo de la barra metálica, los electrones aumentan su energía cinética y, por choques con los electrones contiguos, van sucesivamente aumentando la energía de éstos y, por tanto, su temperatura. El mismo fenómeno de transferencia energética por diferencia de temperatura se va trasladando de una capa a la otra hasta llegar al extremo inicialmente frío de la barra.

Energía interna, calor, equilibrio térmico

Al principio de esta sección se mencionó que otra posibilidad para no "sentir frío" en el invierno consiste en accionar un calentador en la habitación. ¿Qué quiere decir esto? El calentador libera energía dentro del cuarto, la que se toma de la corriente eléctrica o quemando algún combustible. El calentador transforma la energía eléctrica de la corriente en *energía interna* del aire del cuarto; concretamente, el calentador incrementa la energía cinética media de las moléculas de aire del cuarto, lo que se manifiesta como un aumento de su temperatura. El aumento de la temperatura del aire provoca que se pase energía a los otros cuerpos que están dentro de la habitación: las cobijas, la mesa, el librero, de manera que, al final, todos los objetos alcanzan el mismo valor de la temperatura. A este paso de energía por diferencia de temperatura se le llama *calor* (se denota por la letra *Q*).

Se dice entonces que la energía pasa por *calor Q* del aire a los demás objetos. El *calor*, como proceso, deja de existir cuando la temperatura del aire y la de los

demás objetos se igualan, en cuyo caso se dice que los objetos han llegado al *equilibrio térmico* con el aire. Resumiendo lo anterior:

> *El equilibrio térmico entre dos o más objetos es equivalente a que éstos tengan la misma temperatura.*

El *calor* es el proceso mediante el cual se intercambia energía entre los objetos que tienen diferentes temperaturas. Cuando las temperaturas se igualan, el proceso termina, y *Q* es igual a cero. Si se pone en contacto diatérmico un cuerpo de alta temperatura con uno de menor temperatura, el primero disminuirá su energía interna mientras que la del segundo aumentará. Se dice entonces que el sentido en que *Q* procede es del cuerpo de alta al de baja temperatura.

Actividad

Sumerja una cuchara, que previamente ha calentado en la flama de la estufa, en una taza de agua a temperatura ambiente. ¿Cuál de los dos objetos, el agua o la cuchara, disminuye su temperatura?, ¿cuál la aumenta? ¿Cuál de los dos objetos se ha desenergizado por *calor*, y cuál se ha energizado por calor?

En el caso del calentador, su operación consigue que suba la temperatura del cuarto. Para que no disminuya, se deben proteger las paredes de la habitación con una cubierta adiabática que no deje escapar la energía suministrada por el calentador. De lo contrario, el cuarto perdería energía por *calor*, al estar el exterior a una temperatura menor. El lambrín es, como antes se dijo, un material hecho de madera prensada que funciona como material adiabático (también se puede decir que el lambrín es un buen aislante térmico). Cuando en un lapso fijo de tiempo la energía que escapa del cuarto al exterior es mayor que la energía suministrada por el calentador, la temperatura del cuarto tenderá a disminuir, y a aumentar en caso contrario. Si el calentador, funcionando al máximo de potencia no consigue mantener una temperatura confortable, a pesar de utilizar el lambrín, entonces tendremos también que vestirnos con ropas adiabáticas adecuadas.

Un razonamiento semejante lleva a utilizar aires acondicionados para enfrentar los climas cálidos en que la temperatura del ambiente es mayor que la corporal. Tales aparatos disminuyen la energía interna del aire del espacio habitable, al bajar su temperatura.

Para explicar la razón de por qué los objetos de metal y de madera se sienten a temperaturas diferentes, hay que reconsiderar el experimento de conducción de energía por *calor*, a través de la barra metálica. Al poner uno de los extremos en la flama, su temperatura se incrementa en un cierto tiempo, creándose una diferencia de temperatura con respecto al extremo alejado de la flama.

Figura 3-31.
Paneles forrados con cubierta adiabática.

En la figura 3-32, $\Delta T = T_d - T_i$ es la diferencia de temperatura entre el extremo derecho y el extremo izquierdo de la barra de longitud $L = x_d - x_i$. Esta diferencia se establece como consecuencia del paso de energía por calor Q a través de la barra con área transversal A. Si se considera el lapso de tiempo en que ocurre la transferencia de energía por calor, se puede hablar de potencia calorífica:

$$\frac{Q}{\text{tiempo}} = \text{potencia calorífica}$$

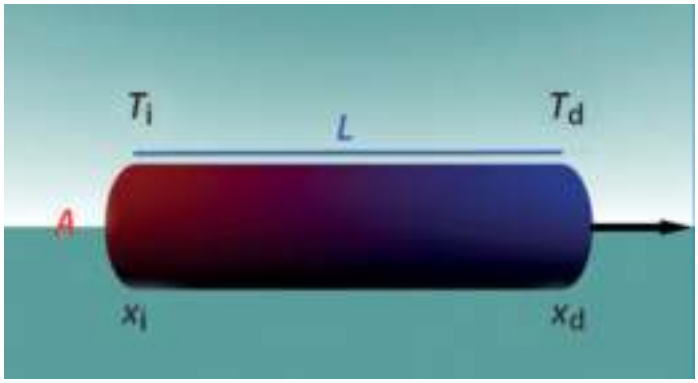


Figura 3-32.
Conducción por calor en una barra metálica.

Experimentalmente se encuentra que la rapidez con la que la energía por calor se transmite es más grande cuanto mayor son los tres factores siguientes:

- El área transversal A de la barra;
- el cociente de la diferencia de temperaturas entre los extremos derecho e izquierdo de la barra y su longitud ($\Delta T/L$), y
- la conductividad térmica del material, K.

Es decir, Q/tiempo es proporcional al producto de los tres factores anteriores:

$$\frac{Q}{\text{tiempo}} = A\frac{\Delta T}{L}K$$

Ahora bien, como la energía por calor Q pasa del extremo izquierdo al derecho, en la dirección positiva del eje x, mientras que la temperatura disminuye hacia la derecha (o sea, que Δt es negativo), se escribe un signo negativo al producto:

$$\frac{Q}{\text{tiempo}} = -A\frac{\Delta T}{L}K$$

Las unidades de Q/tiempo en el Sistema Internacional son joule/s = watt = W.
De esta expresión se ve que las unidades de la *conductividad térmica* de K deben ser:

$$\left[\frac{Q}{\text{tiempo}}\right]\frac{[L]}{[A][\Delta T]} = \frac{\text{Wm}}{\text{m}^2\,°\text{C}} = \frac{\text{W}}{\text{m}°\text{C}}$$

El símbolo °C significa "grado centígrado" o "celsius", que es la unidad de temperatura en la escala de Celsius, la cual se definirá más adelante.

La conductividad térmica K de la madera o de una colcha es mucho menor que la conductividad térmica de un metal, por esto al tocar con la mano uno u otro material, la cantidad de energía Q que se transfiere por calor entre ambos objetos (la mano y el material) en un tiempo dado será muy diferente: mayor en el caso del metal que en el de la madera. Por esta razón las sensaciones térmicas provocadas en la persona serán muy diferentes, de acuerdo con la temperatura corporal, la cual puede ser mayor o menor que la temperatura del ambiente.

a) Primer caso: temperatura ambiente < temperatura corporal
La madera y el metal están a la misma temperatura que el ambiente. En este caso ambos materiales tienen menor temperatura que el cuerpo. Entonces se infiere que la energía por *calor* se transfiere *de las manos a los materiales*, pero más rápidamente hacia el metal que hacia la madera, dando así la sensación de que "el metal es más frío que la madera".

b) Segundo caso: temperatura ambiente > temperatura corporal
Ahora, en cambio, la energía por *calor* se transfiere *de la madera y el metal hacia la mano*; pero, como antes, la cantidad de energía por *calor* transferida del metal es mayor que la de la madera, dando así sensación de que "el metal es más caliente que la madera".

Figura 3-33.
Nieve y lava.

En resumen, el metal se siente más frío que la madera cuando la temperatura ambiental es menor que la corporal; y en caso contrario el metal se siente más caliente que la madera.

El "grado de calentamiento" de un objeto refleja su temperatura. Suele decirse que un cuerpo está "caliente" porque su temperatura es "alta", o que el cuerpo está "frío" porque su temperatura es "baja". Lo alto y lo bajo de la temperatura es relativo a la temperatura corporal. Un objeto está caliente si quema nuestra mano al tocarlo.

Dos cuerpos tienen la misma temperatura cuando están en equilibrio térmico. Esto quiere decir que si ponemos a dos cuerpos en contacto por medio de una pared diatérmica, al conjunto se le encierra adiabáticamente, y no se observan cambios en sus propiedades, como su volumen, su presión o cualquier otra variable, entonces se dice que los objetos están en equilibrio térmico.

Si el estado físico de los cuerpos se modifica al intercambiar energía a través de la pared diatérmica, hasta que se llega al equilibrio térmico, se dice que alcanzan el estado de equilibrio. Si los cuerpos al contacto diatérmico inicial no cambian de estado, o sea no intercambian energía entre ellos, quiere decir que estaban originalmente en equilibrio (figura 3-34).

Figura 3-34.
Dos cuerpos intercambiando energía.

En un cuarto con diferentes objetos, una persona se daría cuenta de que su cuerpo está "más caliente" que la colcha de la cama o que el metal del anaquel, porque su temperatura es mayor que la

de la colcha y los metales. Sin embargo: ¿qué tiene mayor temperatura, la colcha o el metal?

Actividad

Toque con la mano una colcha y un objeto de metal. ¿Qué detecta? A raíz de esta percepción surge entonces la pregunta de si las manos son o no buenos termómetros, si son confiables en la determinación de la temperatura como propiedad intrínseca de los objetos. ¿Por qué? Pues porque en realidad la colcha y el metal están en equilibrio térmico, tienen la misma temperatura ¡aunque la mano detecta "frío" al metal y "caliente" a la colcha!

¿Cómo se comprueba que la colcha y el metal tienen la misma temperatura?

En física, al igual que en otras "ciencias exactas", los conceptos están asociados en general a cantidades que se pueden medir experimentalmente.

Actividad

El siguiente experimento está encaminado a mostrar si las manos son termómetros confiables, para luego construir un termómetro más adecuado. Se colocan tres cubetas con agua, la de la izquierda con agua fría, la del centro con agua tibia y la de la derecha con agua caliente. Se sumerge una mano en la cubeta izquierda y la otra en la cubeta derecha, hasta que alcancen el equilibrio térmico con el agua. Acto seguido se introducen ambas manos en la cubeta del centro. ¿Qué siente ahora en la mano izquierda y en la mano derecha? ¿Siente que el agua de la cubeta del centro está a una temperatura única? Si no es así, ¿sirven las manos como termómetro?

Figura 3-35. Experimento de las tres cubetas.

Quizá habría acuerdo en la interpretación del resultado de este experimento de que las manos no son termómetros fiables. Se puede concluir que la piel de las manos y sus terminales nerviosas no son buenos sensores termoscópicos.

Pero en física debe haber una medida precisa, y no contradictoria (como la que dan las manos) de las propiedades de los cuerpos. Por esto hay que independizar la lectura de temperatura del sentido del tacto, por ejemplo utilizando los termómetros de mercurio. Con este tipo de termómetro la temperatura del agua de la cubeta del centro podría ser de 37 *grados centígrados*. ¿Qué quiere decir esta cantidad? ¿Qué son los "grados centígrados"?

Para contestar a estas preguntas no hay mejor respuesta que la construcción de un termómetro propio.

La construcción de un termómetro se parece a la construcción de una regla para medir longitudes. Esto puede comprobarse al mirar una regla y un termómetro de mercurio. En ambos casos, en la regla y en el termómetro, hay un origen desde el cual empiezan las mediciones: en la regla hay una señal en el cero, a partir del cual se inicia el conteo de la longitud. La regla tiene divisiones de un tamaño que se fija arbitrariamente, mediante convenciones que son adoptadas mundialmente: en el sistema métrico decimal la distancia entre las divisiones más pequeñas se llama "milímetro"; diez milímetros son un centímetro y cien centímetros son un metro.

En el termómetro clínico se adivina que hay un origen también, aunque la primera cifra que aparece grabada en el vidrio es 35, porque la temperatura corporal en estado saludable es de unos 37 grados; esto quiere decir que el origen (o el cero) estaría situado 35 divisiones a la izquierda. Cada grado se compone de diez subdivisiones, o sea de una décima de grado por cada subdivisión.

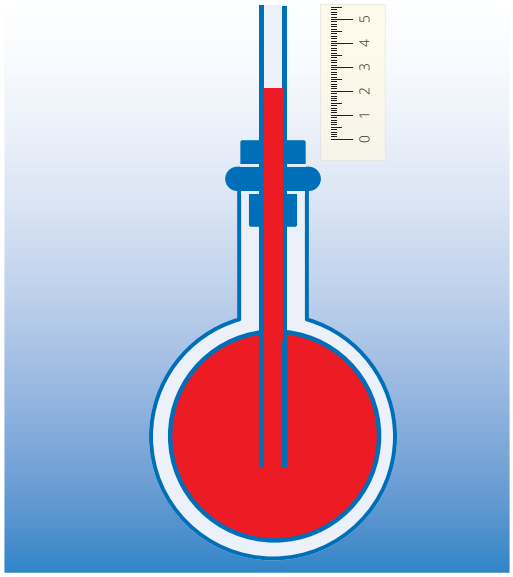


Figura 3-36. Construcción de un termómetro y escala de temperatura.

La lectura de temperatura en un termómetro está asociada con el valor que toma alguna propiedad de la sustancia de que se compone; en un termómetro clínico, esa propiedad es el volumen del mercurio, el cual cambia cuando varía la temperatura.

Construcción de un termómetro

Construya un termómetro casero como sigue: vierta un líquido coloreado en un recipiente de aproximadamente un litro, que bien puede ser agua. Llene con el líquido coloreado una botella de plástico de un tercio de litro o menos. Haga un agujero en un tapón de hule o de corcho y pase por él un popote, de modo que sobresalga unos centímetros. Inserte el tapón con el popote en el cuello de la botella y selle los bordes con parafina derretida de una vela.

Empleando un gotero llene el popote con el líquido coloreado, de modo que sobresalga unos centímetros desde la parte superior del tapón. Ponga una gota de aceite comestible con el gotero sobre la superficie libre del líquido, para que éste no se evapore.

La propiedad que mide la temperatura es el cambio del volumen del líquido coloreado, pues cuando la temperatura varía, el volumen cambia también proporcionalmente.

Para graduar el termómetro se tiene que recurrir a un objeto cuya temperatura en dos estados físicos sea fácil de reproducir, por ejemplo, agua en el estado de congelación y agua en el estado de ebullición. El agua se encuentra en el estado de congelación cuando una porción que está en estado líquido está en equilibrio con otra porción de agua en su estado sólido o hielo. Para poner aproximadamente el agua en el estado de congelación, se colocan varios cubos de hielo en un recipiente con poca agua y se espera a que se empiecen a derretir; se procede a mezclar agua y hielos de tanto en tanto.

Al cabo de un rato, el agua y el hielo alcanzan el equilibrio térmico, quedando así hasta que los hielos se derriten por completo (por esto a tal estado se le llama "punto fijo", porque la temperatura no cambia durante el proceso).

El agua en el punto de ebullición se consigue poniendo agua a hervir en una olla; este estado constituye también un punto fijo, pues mientras el agua hierve, la temperatura no varía.

Actividad

Encuentre ambos puntos fijos, y mida su temperatura empleando para ello un termómetro de mercurio de laboratorio.

Como primer paso en la construcción de la escala del termómetro, se sumerge la botella de líquido coloreado en la mezcla de hielos con agua; se marca con un plumón sobre el popote el nivel del líquido. Al lado de esta marca se escribe el número 0 (cero).

Como segundo paso se sumerge la botella en agua hirviendo, se marca el nivel del líquido en el popote y se escribe el número 100 (cien).

Si hay espacio suficiente entre las dos marcas de 0 a 100, se divide tal intervalo en 100 subdivisiones; entonces cada una corresponderá a un *grado centígrado*, que denotaremos por °C. Éste es el grado, que ahora se llama *grado Celsius*, por convención universal.

Actividad

Lea con el termómetro que construyó la temperatura de un objeto, por ejemplo la temperatura del agua tibia en el experimento de las tres cubetas.

¿Qué tan bien lee su termómetro la temperatura del agua? Para esto, compare la lectura del termómetro casero con la de un termómetro de mercurio comercial al sumergirlos en la cubeta con agua fría. ¿Qué observa? Las lecturas, ¿son iguales o son diferentes? Si son diferentes, ¿en cuánto lo son? ¿Cuál de las dos lecturas es el valor "correcto" de la temperatura del agua fría? Recuerde que el termómetro de mercurio está calibrado a nivel del mar, lo que puede ocasionar que exista una discrepancia en las medidas.

Ahora sumerja los dos termómetros en la cubeta con agua caliente y vea la nueva diferencia en las lecturas, y compárela con la diferencia de las lecturas previas del agua fría. Verá que las diferencias aproximadamente se mantienen. (Aunque la pregunta sobre la temperatura "correcta" persiste.)

¿Se podría concluir que, a pesar de las diferencias en las lecturas, es válido decir que estos termómetros son mejores medidores de la temperatura del agua tibia que las manos? ¿Acaso la temperatura del agua tibia medida por ambos termómetros difiere tanto como para decir que uno de los termómetros lee "alta" temperatura mientras que el otro lee "baja" temperatura (como sucede con las manos)?

Se ha dicho que la temperatura permite saber si un objeto está en equilibrio térmico con otro. De modo que, si se pone en contacto a dos objetos con distintas temperaturas hasta que lleguen al equilibrio, el valor de sus temperaturas finales será el mismo.

Ahora bien, esta temperatura final de equilibrio puede ser medida tanto por el termómetro de mercurio como por el termómetro de líquido coloreado. Pero, al margen de que estos dos termómetros lean o no la temperatura "correcta", de todos modos sus lecturas de cada objeto en equilibrio deben coincidir. Posteriormente se presentará un termómetro que sí lee la temperatura "correcta" de los objetos. Aunque se emplee un termómetro que no la lee, de todos modos cuando dos objetos están en equilibrio térmico las lecturas hechas con este termómetro "imperfecto" deben coincidir.

Con la finalidad de dar un significado más profundo al concepto de temperatura, se presenta en seguida la llamada *ley cero* de la termodinámica. Se llama "cero" porque cuando fue formulada ya habían sido postuladas las leyes de la termodinámica y, dada su importancia, fue necesario introducirla pero sin cambiar el orden de las otras leyes. Como debería ser la inicial, se la llamó "cero".

Ley cero o de transitividad de la termodinámica

Si se tienen tres cuerpos *A*, *B* y *C*, se miden las temperaturas de *A* y *B* con un termómetro obteniendo lecturas iguales; y el termómetro da también la misma

lectura para los cuerpos *A* y *C*, entonces al poner en contacto diatérmico a los cuerpos *B* y *C* estarán también en equilibrio térmico, esto es, en el termómetro se leerá la misma temperatura. En este caso, los tres cuerpos, *A*, *B* y *C*, guardan una relación entre sí, la de "estar en equilibrio térmico". A esta relación se le denomina *transitiva*.

Se podría decir que esto es obvio, porque, si $T_A = T_B$ y, al mismo tiempo $T_A = T_C$ se tiene que cumplir que $T_B = T_C$.

Una consecuencia importante es que: cuando una relación entre cuerpos es transitiva, es porque tienen una propiedad en común que, además, cuando se puede medir, tiene el mismo valor.

Si el cuerpo *A* está en equilibrio térmico con *B*, pero también con *C*, entonces *B* y *C* estarán a su vez en equilibrio térmico; es decir que los tres cuerpos guardan entre sí una relación *R* transitiva con respecto al equilibrio térmico, y esto es así porque tienen algo en común: su temperatura.

Otro ejemplo en que la transitividad de una relación *R* entre objetos es indicativa de una propiedad común entre ellos es la masa. La relación *R* consiste en que al colocar un objeto en cada platillo de una balanza el fiel de ella quede en el centro. Es decir: el objeto *A* está en la relación *R* con *B*, si al colocar cada objeto en un platillo distinto el fiel apunta al centro. Si ahora se considera un tercer objeto *C* que mantenga la relación *R* con *A*, entonces se verá experimentalmente que *C* mantiene la relación *R* con *B*. En otras palabras, *B* y *C* quedan equilibrados en la balanza, pues el fiel apuntará al centro al colocarlos en platillos distintos. Esto quiere decir que *R* es transitiva porque hay una propiedad común a los tres objetos, que es su masa, la que tiene el mismo valor para los tres. También, si la masa de tres objetos cualesquiera es la misma, se puede construir una relación transitiva entre ellas (que es la misma *R* descrita).

Estas ideas fueron plasmadas en un libro sobre termodinámica del científico escocés James C. Maxwell (1831-1879), quien además formuló las leyes básicas del electromagnetismo.

El termómetro de gas a volumen constante y la lectura "correcta" de la temperatura de un objeto

Recordando la pregunta sobre cuál es la temperatura "correcta" de un objeto o sistema, cabe preguntarse: ¿existe algún termómetro que mida la temperatura "correcta" del agua tibia?

Se ha visto que las lecturas de los termómetros de mercurio y del líquido coloreado son diferentes, así como las de otros termómetros que se nos ocurra utilizar. Entonces, a pesar de saber que la temperatura es una propiedad intrínseca de los cuerpos, ¿habrá al menos un termómetro que pueda realmente medirla correctamente y con exactitud? El primer termómetro con la propiedad de medir la temperatura correcta es el conocido como "termómetro de gas a volumen constante", que se representa en la figura 3-37.

Este termómetro funciona conservando el gas a un volumen constante, se usa la presión del gas para medir la temperatura. Cuando la temperatura del gas aumenta también lo hace su energía interna y, por lo tanto, la presión.

La presión del gas se debe a los choques de las moléculas contra las paredes del recipiente que lo contiene; en cada choque la molécula empuja a la pared con una cierta fuerza que se debe al cambio de la cantidad de movimiento (el producto de la masa por la velocidad) en el impacto. Cuando se transfiere energía al gas, la velocidad de las moléculas se incrementa, y por lo tanto se produce un aumento en la presión. De hecho, la temperatura del gas está relacionada directamente con la energía cinética media de las moléculas que lo integran.

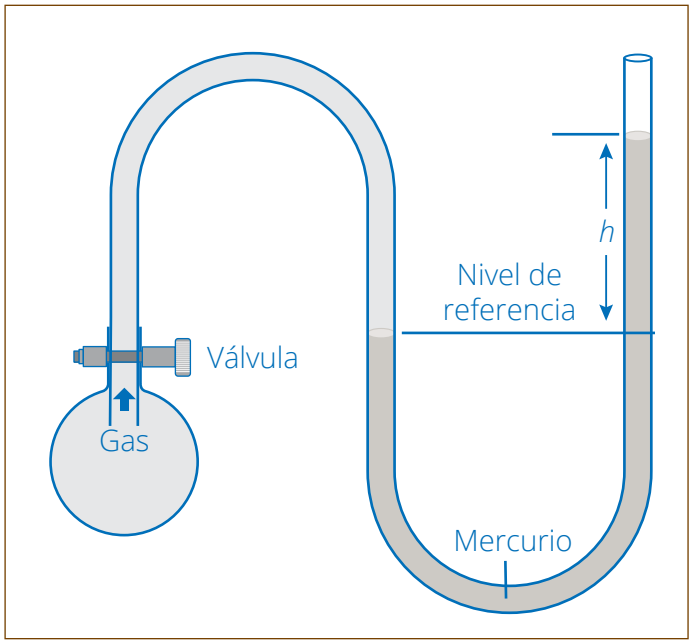


Figura 3-37. Termómetro de gas a volumen constante.

Como se observa en la figura, el bulbo de volumen V está conectado, por medio de un tubo delgado a una columna de mercurio para medir la presión. El gas del bulbo que llena al tubo no altera apreciablemente su volumen, por lo que puede considerarse entonces que el volumen del gas es V y las medidas de presión serán a volumen constante.

La presión del gas se determina por la diferencia de altura h de las columnas de mercurio mediante la expresión:

$$P = P_a \pm \rho g h$$

donde p_a es la presión atmosférica, ρ es la densidad del mercurio, g es la aceleración de la gravedad.

El signo positivo o negativo en esta ecuación se determina de la siguiente manera: si la altura de la columna izquierda de mercurio es menor que la de la derecha, se utiliza el signo positivo, por lo que la presión del aire del bulbo es mayor que la presión del exterior. Si la altura de la columna izquierda es mayor que la de la derecha, se utiliza el signo negativo, y por tanto la presión del interior del bulbo es menor que la atmosférica.

En este termómetro de gas a volumen constante, cuando la temperatura T aumenta en ΔT, la presión aumenta en ΔP. Así, a mayor temperatura en el bulbo, mayor presión y a menor temperatura del gas en el bulbo, menor presión.

Se tiene una relación de proporcionalidad entre la temperatura y la presión:

$$\Delta T = A \Delta P, \text{ a volumen constante}$$

donde A es una constante igual a tan φ, como se puede ver en la figura 3-38.

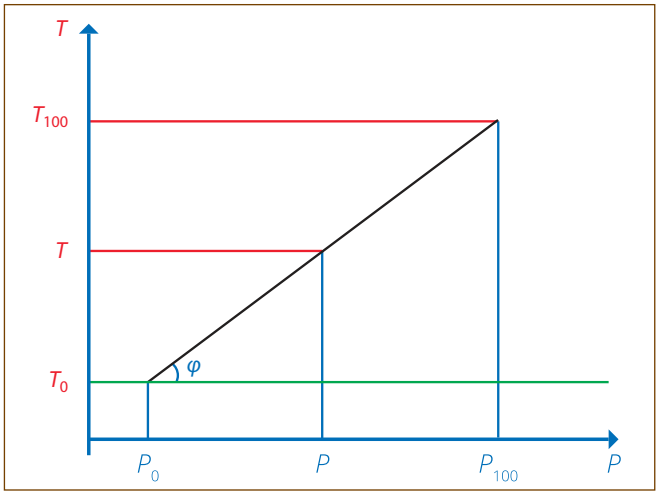


Figura 3-38.
Construcción de una escala termométrica.

El procedimiento para construir la escala Celsius de temperatura con este termómetro se parece al procedimiento descrito para graduar el termómetro de líquido coloreado. Se sumerge el bulbo en agua en equilibrio con hielo y se mide la altura h_0 del mercurio, para calcular la presión P_0 con la ecuación:

$$P_0 = P_a - \rho g h_0$$

En seguida se sumerge el bulbo en agua hirviendo y se mide la nueva altura h_{100}, para calcular la presión P_{100}:

$$P_{100} = P_a + \rho g h_{100}$$

A cada una de estas presiones se le asocian las temperaturas correspondientes T_0 y T_{100}.

Actividad

Deduzca, de la figura, la siguiente relación trigonométrica:

$$\tan\varphi = \frac{T_{100} - T_0}{P_{100} - P_0} = \frac{T - T_0}{P - P_0}$$

de aquí se obtiene:

$$T = \frac{T_{100} - T_0}{P_{100} - P_0}(P - P_0) + T_0$$

Si se asigna, como hizo Celsius, los valores T_0 = 0 °C y T_{100} = 100 °C, se obtiene:

$$T = \frac{100}{P_{100} - P_0}(P - P_0)$$

Ahora bien, si se quiere medir la temperatura del agua tibia en la cubeta con este termómetro, se coloca el bulbo dentro de ella, se mide h y se determina P, de:

$$P = P_a \pm \rho g h$$

(El signo será positivo o negativo, dependiendo de la forma en la que se construyó el termómetro.)

Este valor de P se sustituye en la ecuación anterior y se calcula T, que es el valor de la temperatura del agua tibia en la cubeta.

Se puede comprobar en la ecuación de la temperatura que $T = 0$ °C si $P = P_0$, y que $T = 100$ °C cuando $P = P_{100}$. Esta experiencia se realiza a nivel del mar.

En relación con estas medidas, es interesante notar que:

1. Si se empieza con un tipo de gas en el bulbo, por ejemplo aire, el valor de la temperatura calculado cambia cuando se extrae aire por la válvula, es decir, cuando se baja la densidad.
2. Lo mismo sucede si en el bulbo se emplea otro gas, por ejemplo dióxido de carbono (el gas de los refrescos).

En general la lectura de la temperatura depende de la naturaleza del gas y de su densidad.

3. Si ahora se extrae más gas del bulbo, disminuyendo su densidad, las diferencias en las temperaturas calculadas con gases diferentes, tienden a disminuir aproximándose a cero, conforme la densidad tiende a cero.

Este hecho indica que la temperatura de un cuerpo medida con un gas cualquiera, siempre y cuando su densidad sea cercana a cero, será el valor "verdadero".

Entonces, efectivamente, existe un termómetro confiable, el termómetro de gas a volumen constante y de muy baja densidad (muy diluido). Este hecho fue fundamental para el establecimiento de la termodinámica como ciencia exacta.

Cualquier otro termómetro, por ejemplo el clínico de mercurio, se graduó de modo que su escala coincidiera con la escala del termómetro de gas muy diluido. Así sucedió históricamente en el desarrollo de la termodinámica moderna.

A la escala Celsius se le conoce también como centígrada, porque se construye de modo que entre el agua en equilibrio con hielo (T_{cong}) y agua en ebullición (T_{eb}) haya exactamente cien grados. Es una escala muy antigua, pues fue diseñada por el físico sueco Anders Celsius (1701-1744) por la primera mitad del siglo XVIII.

En la escala Celsius:

$$T_{eb} - T_{cong} = 100\ °\text{C};$$
$$T_{cong} = 0\ °\text{C};$$
$$T_{eb} = 100\ °\text{C}.$$

Pero existe otra la escala, llamada Fahrenheit en honor a su inventor que vivió entre los años 1686 y 1736; en ésta, se elige:

$$T_{eb} - T_{cong} = 180\ °F;$$
$$T_{cong} = 32\ °F;$$
$$T_{eb} = 212\ °F.$$

Actividad

Deducir, de lo anterior, la siguiente relación entre las escalas de Celsius y Fahrenheit:

$$°C = \frac{5}{9}(°F - 32)$$

Calor, transferencia de calor y procesos térmicos: dilatación y formas de propagación

Ecuación de estado de un "gas muy diluido", gas ideal o gas perfecto

¿Cómo varía el volumen con la temperatura, si ahora se deja fija la presión? El conocimiento de esta relación tiene gran importancia práctica, por ejemplo en el diseño de sistemas de ventilación.

Por otra parte, el conocimiento del cambio de volumen con la temperatura a presión constante es relevante en el manejo de materiales sólidos como el hierro, con el que se construyen las vías de ferrocarril. En éstas se deja un espacio libre entre los rieles, para que, al aumentar la temperatura, tengan espacio libre para dilatarse, de lo contrario la vía se levanta y se tuerce en los puntos de contacto, como en la figura 3-39.

Figura 3-39. Vías torcidas en el punto de unión.

Se mencionó que la necesidad de conocer el comportamiento de los gases cuando cambian sus propiedades: presión, volumen y temperatura, surgió del diseño de barómetros útiles en la predicción del tiempo atmosférico, pero también en el diseño de los motores térmicos.

El barómetro es un instrumento que mide la presión atmosférica y el más común consta básicamente de una columna de mercurio. Se requiere conocer el cambio del volumen con la presión, a temperatura constante (la ambiental). Una presión alta hace subir la columna de mercurio e indica "buen tiempo" y una presión baja, "mal tiempo".

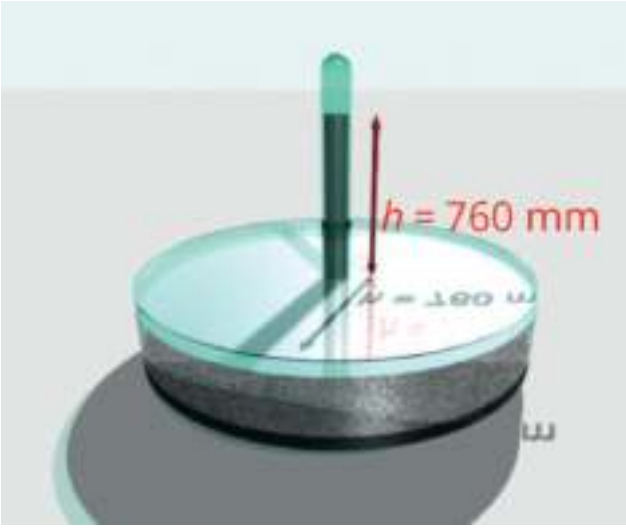


Figura 3-40. Barómetro de mercurio.

En un motor térmico (véanse las figuras de los motores térmicos de Newcomen y Watt, más adelante) el vapor de agua mezclado con el aire se dilata y contrae en el cilindro, haciendo que el pistón se mueva. Durante estos movimientos la presión, temperatura y volumen de la mezcla dentro del cilindro cambian continuamente. Entender la relación entre estos cambios es básico para conseguir un motor eficiente, es decir, un motor que optimice la cantidad de carbón que se quema en su caldera.

A la relación que hay entre las variables de un gas: volumen, presión y temperatura, se le conoce como *ecuación de estado*. A los físicos y químicos les tomó cientos de años descubrir la ecuación de estado de los gases. Por su simplicidad, la primera ecuación de estado que se obtuvo fue la de los gases poco densos o muy diluidos, también llamados *gases perfectos* o *ideales*.

Leyes de Boyle-Mariotte y Gay Lussac-Charles

La *ley de Boyle-Mariotte* especifica la relación entre el volumen y la presión de un gas, cuando la temperatura se mantiene constante. La ley se llama así porque fue obtenida de manera independiente por los científicos Robert Boyle (1627-1691) en 1660 en Inglaterra, y Edme Mariotte (1620-1684) en 1676 en Francia.

Actividad

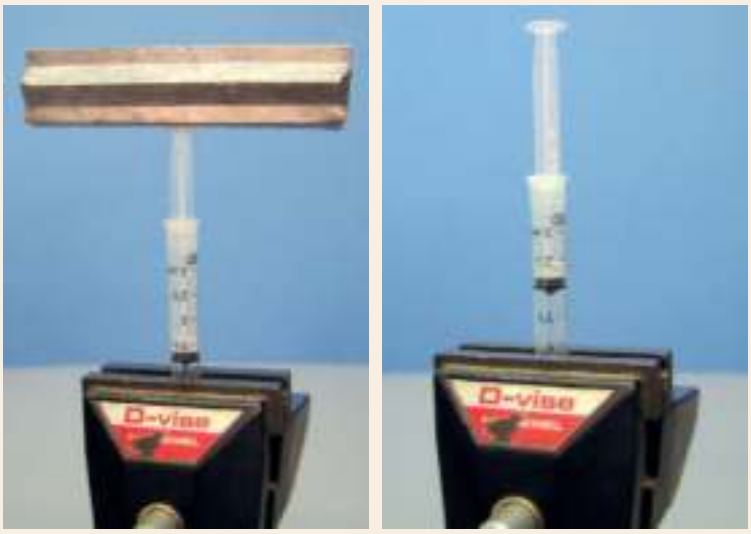
Determine la relación entre presión y volumen, a la temperatura ambiente, mediante una jeringa graduada a la que le quita la aguja y sella el orificio. Mantenga la jeringa en posición vertical, como se ilustra en la figura.

Agregue pesos variables sobre la base del émbolo de la jeringa y analice mediante su graduación, lo que pasa con el volumen del aire encerrado en su interior. Grafique las medidas en un plano cartesiano donde el eje vertical corresponde al volumen y el eje horizontal a la presión (obtenida

de dividir cada peso entre el área del émbolo). El experimento se realiza a temperatura constante, ya que el aire en el interior de la jeringa está en contacto diatérmico con la atmósfera, de modo que:

$$PV = C \text{ (ley de Boyle–Mariotte)},$$

donde C es una constante relacionada con la temperatura del cuarto.



Si a temperatura constante se introduce más gas a la jeringa, el volumen tendrá que aumentar proporcionalmente, de modo que C no sólo depende de la temperatura, sino que también varía proporcionalmente con la cantidad de gas en el interior. Es decir:

$$C = NA,$$

donde ahora A es el único factor que depende de la temperatura y N es la cantidad de moléculas de gas contenidas en la jeringa.

Al ser A proporcional a la temperatura (lo que ha sido determinado experimentalmente), se puede llamar k a la constante de proporcionalidad, de manera que:

$$A = kT$$

Al sustituir A en la ecuación para C, queda:

$$C = NkT.$$

Al reemplazar este valor de C en la *ley de Boyle-Mariotte*, nos da que:

$$PV = NkT.$$

La temperatura T en esta ecuación, no puede estar expresada en ninguna de las escalas hasta ahora definidas, por las razones siguientes. Hay que tener en cuenta que el origen en las escalas Celsius y Fahrenheit se fija arbitrariamente, por lo que el cociente PV/Nk dependerá de dicho origen, mientras que P, V, N y k son cantidades que no son arbitrarias, sino que se determinan objetivamente.

Para obtener la respuesta correcta, el científico francés Gay-Lussac (1778-1850) encontró que, a presión constante, el volumen V variaba linealmente con la temperatura en la escala Celsius. Además, él y otros científicos hallaron que el cambio relativo de volumen,

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$$

respecto a la variación de temperatura $\Delta T = T - T_0$, *tiene el mismo valor* para todos los gases, cuando su densidad es muy baja, es decir, cuando están muy diluidos o se comportan "idealmente"; o sea:

$$\frac{1}{V_0}\frac{\Delta V}{\Delta T} = B_0 = 0.003661\frac{1}{°C}$$

donde B_0 es el llamado coeficiente de dilatación volumétrico a presión constante.

En la ecuación anterior V_0 es el valor del volumen a la temperatura T_0 = 0 °C. De la última ecuación, al despejar ΔV se obtiene:

$$\Delta V = V - V_0 = B_0 V_0 \Delta T = B_0 V_0 (T - T_0) = B_0 V_0 (T - 0) = B_0 V_0 T$$

De aquí:

$$V = V_0 + B_0 V_0 T = V_0 (1 + B_0 T) = B_0 V_0 \left(T + \frac{1}{B_0} \right)$$

Ésta es la *ley de Gay-Lussac*, o también llamada de Charles (1746-1823), por haber sido descubierta también por este físico francés, de manera independiente.

Hay que recordar que en esta ecuación, T es la temperatura en la escala Celsius y que, por eso se trata de una temperatura que no es objetiva debido a que su origen ha sido fijado arbitrariamente al asignar el valor 0 °C al punto de congelamiento del agua. Sin embargo, dado que el volumen no puede ser negativo, debe cumplirse que:

$$T + \frac{1}{B_0} \geq 0$$

es decir,

$$T \geq -\frac{1}{B_0} = -\frac{1}{0.003661\left(\frac{1}{°C}\right)} = -273.15\ °C$$

En otras palabras, T tiene que ser mayor o igual que –273.15 °C; de lo contrario, para temperaturas menores, el volumen de los gases sería negativo. El valor mínimo que se puede alcanzar en la escala Celsius es por tanto de –273.15 °C.

O sea, este valor mínimo es un valor no arbitrario, que bien puede ser el origen objetivo de otra escala de temperatura. Esta temperatura se define por:

$$T_K = T + \frac{1}{B_0} = T(\text{en } °C) + 273.15\ °C$$

T_K es la temperatura medida en la escala llamada de Kelvin, en honor de William Thomson (1824-1907), quien más tarde sería lord Kelvin. También es llamada escala de temperatura objetiva o absoluta. En esta escala se define el tamaño del grado Kelvin, igual al tamaño del grado Celsius. En términos de ella, la *ley de Gay Lussac-Charles* queda como:

$$V = B_0 V_0 T_K$$

Obviamente $V > 0$ si $T > 0$. Pero siempre se tendrá $T > 0$, porque $T > -273.15$ °C. El valor $T = 0$ K no se puede alcanzar, pues el volumen de cualquier gas a esta temperatura sería cero, lo que físicamente no tiene sentido. Con esto se tiene que los gases ideales cumplen con la siguiente relación entre sus variables P, V, T y N:

$$PV = NkT_K$$

De modo que, tanto del lado izquierdo como del lado derecho de la ecuación, se tienen cantidades objetivas, es decir, no dependen de un origen que haya sido elegido arbitrariamente. N es un número extraordinariamente grande, pues se trata de la cantidad de moléculas que hay en el volumen V, por ejemplo un litro.

Descripción microscópica

Conviene recordar ahora que la materia está formada de átomos; pero si los átomos se agregan en unidades mayores, entonces forman moléculas. El agua, por ejemplo, está constituida de moléculas, formada cada una de ellas por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, por lo que su fórmula constitutiva se escribe como H_2O. El agua puede estar en estado de *vapor*, en estado *líquido* o en estado *sólido*, dependiendo de la distancia relativa entre las moléculas. En el estado gaseoso las moléculas estarán más alejadas unas de otras que en los estados líquido o sólido.

La *cantidad de sustancia* es la cantidad de átomos o moléculas que una cierta porción de ella contiene. La unidad de cantidad de sustancia es el mol, que es el número de átomos que hay en 12 gramos del isótopo 12 del carbón.

En un mol de átomos de ^{12}C hay 6.02×10^{23} de estos átomos. Asimismo, la cantidad de moléculas H_2O que hay en un mol de moléculas de agua, es también 6.02×10^{23}. De hecho, y por definición, todos los mol de cualquier sustancia contienen la misma cantidad de átomos o moléculas (que se llamarán elementos estructurales): 6.02×10^{23}.

El *número de Avogadro* es la cantidad de elementos estructurales que hay en un mol. Ese número es 6.02×10^{23} y se le representa por N_A.

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$$

Después del número 6.02×10^{23} aparece la unidad $\text{mol}^{-1} = {}^{1}/_{\text{mol}}$, porque es el número de elementos estructurales por cada mol. Así, ¿cuántos elementos estructurales habrá en, por ejemplo, 2 mol de moléculas de agua, pues:

$$N = 2\ \text{mol} \times 6.02 \times 10^{23} \times \text{mol}^{-1} = 12.04 \times 10^{23}\,\text{moléculas de } H_2O$$

Si en una sustancia hay N elementos estructurales, N se puede expresar en mol, dividiendo entre N_A. A esta cantidad se le representa por la letra n. Así pues, n representa a la cantidad de materia expresada en mol. Por ejemplo, en el caso anterior:

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{2 \times 6.02 \times 10^{23}}{6.02 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}} = 2\ \text{mol}$$

De $n = {}^{N}/_{N_A}$ se sigue que $N = nN_A$, por lo que la ecuación de estado de los gases perfectos o ideales queda como:

$$PV = nN_A kT_K$$

Pero el producto $N_A k$ es la llamada *constante de los gases*, que se representa por R, y tiene un valor de $8.315\ {}^{\text{J}}/_{\text{mol K}}$ (en las unidades del SI). Con esto, finalmente se obtiene la ecuación de estado de los gases ideales:

$$PV = nRT_k$$

El aire, por ejemplo, se comporta siguiendo aproximadamente la ley de los gases ideales. Esto quiere decir que, para valores de P, T y n como los del ambiente, el valor calculado de V no difiere en más de un 5% del valor correcto, experimentalmente medido.

Conservación de la energía

¿Cómo determinar con exactitud la proporción del gasto de gas destinado a la cocción de alimentos?

El gasto de gas en la preparación de alimentos depende de varios factores: la dieta, la cantidad de habitantes en el hogar, los hábitos alimenticios, el tipo de estufa, etc. Los cálculos del ahorro se basarán, por tanto, en consideraciones generales. Los alimentos se pueden cocinar de diferentes formas: friéndolos en una sartén con aceite, poniéndolos en una olla con agua a hervir, etc. Consideremos solamente el segundo caso, por ser el de mayor gasto de gas.

Cocer un alimento significa elevar su temperatura desde la del ambiente hasta la del punto de ebullición del agua (la que, como vimos, es de 100 °C a la altura del nivel del mar, pero disminuye con la altura del lugar).

Se tienen las siguientes transferencias de energía: por un lado la flama del gas transfiere energía por calor al recipiente de cocción, el agua recibe esa energía y empieza a hervir. Cuando hierve, el agua ya no aumenta su temperatura, ya que comienza a evaporarse, pero al mismo tiempo continúa pasando energía por calor al alimento crudo, hasta que lo cuece.

Si una cantidad de agua, de masa m, estaba al inicio del calentamiento a la temperatura T_0 y ésta se eleva a T, tenemos un incremento, denotado por ΔT, de modo que,

$$\Delta T = T - T_0$$

Este incremento de temperatura es ocasionado por un aumento ΔU en la energía interna del agua, dado por:

$$\Delta U = Q$$

En esta ecuación, Q es la energía que por calor (quemando gas) pasa de la flama a la masa m de agua, hasta que su temperatura se eleva al valor T; es decir, es la energía transferida debido a la diferencia de temperatura entre la alta temperatura de la flama y la menor temperatura del agua. La ecuación anterior se basa en el *principio de conservación de la energía*, que establece que la energía que recibe la masa m de agua por calor de la flama se invierte en aumentar su energía interna. Desde luego, hay que considerar otras energías que no van de la flama a la olla y después de ésta al agua: la energía que por calor se pierde hacia el aire, la energía de calentamiento de la parrilla, etc. Tomando todos estos efectos en cuenta, indudablemente se satisface que la energía de la flama se conserva.

La cantidad de calor Q puede medirse por el efecto que produce en el agua, al elevar su temperatura en $\Delta T = T - T_0$.

Capacidad térmica

Si, para una masa m fija de agua, la cantidad de calor Q se duplica, entonces el incremento de energía interna también se duplica, ocurriendo lo mismo con el cambio de temperatura de la sustancia que se está considerando. Es decir, Q y ΔT son directamente proporcionales:

$$\Delta T \propto Q, \text{ con } m \text{ fija}$$

Pero ahora hay algo interesante: si la misma cantidad de *calor Q* hubiese aumentado la energía interna de una mayor cantidad de agua, el aumento de temperatura provocado hubiese sido menor.

Actividad

Compruebe lo que menciona el párrafo anterior calentando en la estufa medio litro de agua durante tres minutos y, en la misma parrilla, un litro de agua durante el mismo tiempo y comparando las temperaturas finales.

Es decir, para una sustancia determinada, el cambio de temperatura ante un incremento en su energía interna por calor es inversamente proporcional a la cantidad de sustancia. Si la cantidad de sustancia aumenta en cierta proporción, el cambio en la temperatura es inversamente proporcional.

Uno se puede imaginar que el cambio de temperatura de una alberca que se calienta por tres minutos es prácticamente de 0 ºC, pero una pequeña cantidad de agua, con la misma flama, puede llegar a hervir.

Entonces, para una cantidad de *calor Q* fija,

$$\Delta T \propto \frac{1}{m}$$

La propiedad que expresa el aumento de temperatura de una cierta cantidad *m* de sustancia, al incrementar su energía interna por una cantidad de *calor Q*, se llama *capacidad térmica*, y se representa por la letra *C*. La capacidad térmica es proporcional a la cantidad de sustancia, que medimos por su masa *m*, es decir:

$$C \propto m$$

Si *Q* es fija

$$\Delta T \propto \frac{1}{C}$$

De modo que, resumiendo lo expresado hasta aquí:

$$\Delta T = \frac{Q}{C}$$

Si se despeja *C*, quedará:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Lo que se ha mencionado hasta aquí para incrementos de la temperatura debidos al aumento de le energía interna del objeto por *calor* es válido para decrementos de la temperatura ocasionados por disminución de la energía interna del objeto por *calor* si se cambian los signos de Q y ΔT (con lo cual C se mantiene positiva). Las unidades de C son las de Q (joules), divididas entre las de ΔT, que son grados Celsius, es decir:

$$[C] = \frac{\text{joule}}{°\text{C}}$$

Capacidad térmica específica

Ahora bien, si se aumenta la energía interna por calor de un kilo de agua y uno de mercurio, con la misma cantidad de calor Q, ¿qué sustancia aumentará más su temperatura? En el experimento, tanto las masas como Q son los mismos, pero la temperatura a que llega el agua es mucho menor que la del mercurio (esto se explica porque la C del mercurio es menor que la C del agua). Por lo tanto, el cambio de temperatura también depende de la naturaleza química de la sustancia. Entonces, para comparar adecuadamente la respuesta térmica de una sustancia con otra ante una energización por calor, definimos una nueva capacidad térmica, que sea para la misma cantidad de masa:

$$c = \frac{C}{m}$$

A c se le llama *capacidad térmica específica*, queriendo decir con *específico* que ella mide la respuesta térmica de una masa fija unitaria (un kilogramo) de dicha sustancia. La c depende así sólo de la naturaleza de la sustancia. Las unidades de c son las mismas que las de C, pero divididas por la unidad de la masa que es 1 kg; es decir,

$$[c] = \frac{\text{joule}}{\text{kg}°\text{C}}$$

La capacidad térmica específica del agua es una de las más grandes; debido a esto, el aumento de su temperatura es menor que el de otras sustancias, cuando a masas iguales se les transfiere la misma cantidad de energía por calor. En la tabla 3-1 se ofrecen datos comparativos de c.

Tabla 3-1. Calores específicos

Sustancia	c (cal/g°C)
Agua	1.00
Hielo	0.55
Vapor de agua	0.50
Aluminio	0.22
Vidrio	0.20
Hierro	0.11
Latón	0.094
Cobre	0.093
Plata	0.056
Mercurio	0.033
Plomo	0.031

Las unidades en que está expresada *c* en la tabla 3-1 difieren de las empleadas en el SIU; ello obedece a razones históricas que se explican a continuación.

Medición del calor

La sustancia que se tomó como patrón para medir la cantidad de *calor* fue el agua, observando su incremento de temperatura ante una energización por *calor* conocida. El experimento es parecido al que se realiza en los laboratorios de las escuelas: en un vaso de material aislante se vierte una cierta cantidad de agua, a la temperatura de 14.5 °C. Luego se sumerge en el agua un alambre por el que pasa una corriente, hasta que la temperatura del agua suba un grado centígrado.

El alambre se calienta con el paso de la corriente, subiendo su temperatura por arriba de la del agua. Esto ocasiona que el agua se energice por *calor* y que, como consecuencia, eleve su temperatura. Se dice que la cantidad de *calor* con que se energiza el agua es de *1 caloría*, si la temperatura de 1 gramo de agua sube de 14.5 °C a 15.5 °C (al nivel del mar).

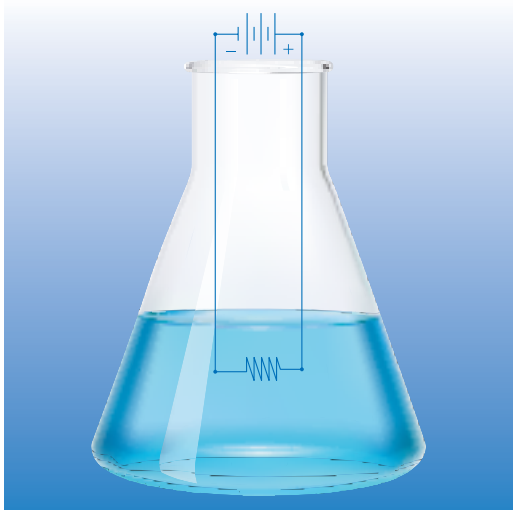


Figura 3-41. Experimento para determinar la caloría.

Para una masa de 1 gramo, se tendrá que la cantidad de *calor* involucrada es de:

$$1\ \text{caloría} = 1\ \text{cal} = (1\ \text{g})c\,\Delta T = (1\ \text{g})c(15.5\ °\text{C} - 14.5\ °\text{C}) = 1\ \text{g}(1\ °\text{C})c$$

El valor de 1 cal, que coincide numéricamente con la capacidad térmica específica *c* del agua a 14.5°C. Experimentalmente se obtiene que la energía necesaria que debe transferir la resistencia a cada gramo de agua para elevar su temperatura en un grado centígrado es de 4.185 joules; de manera que:

$$1\ \text{cal} = 4.185\ \text{joules}.$$

La cantidad de calor *Q* que calienta una masa *m* de agua, de 14.5 °C a 15.5 °C será:

$$Q = mc\,\Delta T = C\,\Delta T\ \text{joule}.$$

En calorías, el calor necesario para energizar una masa *m'* cualquiera de otra sustancia diferente del agua, y elevar su temperatura en ΔT, será de:

$$Q' = m'c'\Delta T = C'\Delta T.$$

En la expresión anterior, las cantidades relativas a la otra sustancia se marcan con una prima. En el caso del experimento con un kilo de agua y uno de mercurio

(es decir, m = 1 kg), el aumento de temperatura ante la energización por la misma cantidad de calor Q será $\Delta T = Q/_C$, para el agua, y $\Delta T' = Q/_{C'}$, para el mercurio. Como $c > c'$, se sigue que $\Delta T < \Delta T'$; es decir, el mercurio "se calienta" más.

La tabla anterior de c para diferentes sustancias muestra que:

$$\frac{\Delta T'}{\Delta T} = \frac{\frac{Q}{c'}}{\frac{Q}{c}} = \frac{c}{c'} = \frac{1}{0.033} = 30.3$$

es decir, la masa de 1 kg de mercurio aumenta más de treinta veces su temperatura que la masa de 1 kg de agua, ante la misma cantidad de *calor Q*. Se dice, por semejanza con el concepto de masa, que el agua tiene mayor "inercia térmica" que el mercurio (y que muchas otras sustancias).

¿Por qué el clima cerca de grandes lagos o el mar, es más estable que en regiones alejadas del mar? ¿Cómo influye el hecho de que la capacidad térmica específica del agua sea muy grande, y que hay una gran masa de agua?

La relación cuantitativa entre las unidades en que se puede medir c (capacidad térmica específica), se deduce de la siguiente manera:

$$\frac{1\ \text{cal}}{\text{g°C}} = \frac{4.185\ \text{joule}}{10^{-3}\ \text{kg°C}} = 4185\frac{\text{joule}}{\text{kg°C}}$$

Empleando esta conversión es posible reescribir la tabla anterior en $^{\text{joule}}/_{\text{kg°C}}$, simplemente multiplicando los valores por 4 185.

Capacidad térmica molar

Descripción microscópica. Las sustancias son de dos clases: elementos y compuestos. Los elementos no pueden descomponerse en sustancias químicas más simples por métodos ordinarios de la química, pero sí un compuesto. En general, los elementos están formados por unidades estructurales microscópicas llamadas *átomos*, mientras que los compuestos están formados por unidades estructurales llamadas *moléculas* (que son conjuntos de átomos).

En el SIU, la unidad de cantidad de sustancia es el mol. El mol es la cantidad de átomos que hay en 12 gramos del isótopo carbón-12, que es igual a una cantidad constante llamada *número de Avogrado:* $N_A = 6.23 \times 10^{23}$. Un mol de moléculas de agua, H_2O, también tiene N_A moléculas, al igual que un mol de cualquier otra sustancia. Si N fuera la cantidad de moléculas de agua en un recipiente, la cantidad de sustancia en moles sería $n = N/_{N_A}$.

Entonces, la *capacidad térmica molar*, denotada por c^*, es:

$$c^* = \frac{C}{n}$$

La respuesta térmica molar comparativa de una sustancia se refiere al cambio de temperatura cuando se energiza, por una cantidad fija de *calor*, una misma cantidad de átomos o moléculas. La respuesta térmica dependerá entonces de la forma como esos N_A elementos estén estructurados microscópicamente en 1 mol. En la tabla siguiente se muestra la capacidad térmica molar de algunos gases, agrupándolos en monoatómicos, diatómicos y poliatómicos. La respuesta térmica de 1 mol de cada tipo de gas es muy parecida cuantitativamente.

Tabla 3-2. Capacidad térmica molar

Gas	*c* (joule/mol °C)
Monoatómico	
He	20.8
Ar	20.8
Diatómico	
H_2	28.8
N_2	29.1
O_2	29.4
Poliatómico	
CO_2	37.0
NH_3	36.8

Formas del calor: conducción, convección y radiación

Si existe una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos, se dan las condiciones para la existencia de una interacción térmica por calor. Las formas en que un objeto puede influir energéticamente por calor sobre otros, que se encuentran a diferente temperatura, son tres: conducción, convección y radiación.

Un ejemplo sencillo donde ocurre el proceso de *calor por conducción* es una olla con agua encima de la flama de una estufa. Basta la diferencia de temperatura entre la flama y el metal de la olla para que éste aumente su temperatura, y lo mismo ocurrirá entre el metal y el agua, dándose la interacción térmica por *calor* entre los tres cuerpos.

En este proceso de conducción, el término "conducción de calor" recuerda la antigua teoría del calórico, en que se lo consideraba una especie de fluido que pasaba de un cuerpo de alta a uno de baja temperatura. La pared diatérmica era entonces el conducto por donde el *calor* "fluía" de un objeto al otro.

Una propiedad de los materiales a través de los cuales se "conduce" *calor* es la llamada *conductividad térmica*. Cuanto más alto su valor, es mejor la interacción térmica entre los objetos que el material separa. La conductividad térmica de los metales es, en general, muy superior a la de otros materiales como la madera y

la cerámica. Una pared diatérmica tiene una conductividad térmica mucho más grande que la de una adiabática. La pared adiabática perfecta tendría conductividad térmica cero: no "conduciría" *calor* entre los cuerpos.

Se vio ya que la rapidez de la interacción térmica por *calor* de *conducción* entre dos objetos, es decir, la potencia de energización por *calor*, depende del tamaño de la superficie de contacto entre los objetos, el espesor de la pared diatérmica, la diferencia de temperatura entre los cuerpos y la conductividad térmica de la pared, entre otros factores relevantes.

La potencia tiene unidades de energía entre tiempo, es decir, de $^{\text{joule}}/_{\text{segundo}}$ en el SIU. A la unidad de potencia se le llama watt (que se simboliza W), de modo que:

$$1\text{W} = 1\ ^{\text{Joule}}/_{\text{segundo}}$$

En forma abreviada:

$$\text{W} = {}^{\text{J}}/_{\text{S}}$$

El *calor por convección* entre dos cuerpos se presenta, por ejemplo, cuando el aire alrededor de un cuerpo caliente aumenta su temperatura, su densidad disminuye y, por lo tanto, sube, intercambiando energía por *calor* con las regiones superiores que se encuentran a menor temperatura. Este proceso puede repetirse cíclicamente, dando lugar a las llamadas *corrientes de convección*.

Como el proceso de transporte energético por el movimiento de la masa de aire ocurre en un tiempo dado, en realidad se está hablando de la potencia de *calor* por convección. La potencia del *calor* por convección depende de factores como: la diferencia de temperatura entre las regiones caliente y fría, de la geometría de ambas regiones, de la rapidez de transporte del fluido (el aire en el caso que se describe).

Después de calentar agua en una olla, si se acerca una mano a ésta, sin tocarla, seguramente percibirá que su mano se calienta. Como usted no tocó con su mano la superficie de la olla, no se trata de *calor* por conducción, y como tampoco se trata del aire caliente que escapa hacia arriba, tampoco se trata de *calor* por convección.

Lo que sucede es que sobre su mano está incidiendo radiación electromagnética, proveniente de la superficie de la olla sólo por estar a una temperatura superior a la temperatura del aire del cuarto de la cocina. En este caso se trata de *calor por radiación*.

La radiación electromagnética transporta energía en un cierto tiempo y, por eso, se trata de potencia de *calor* por radiación.

Todo objeto termodinámico, por el hecho de tener una temperatura emite radiación electromagnética. Si la olla está a la misma temperatura que los demás objetos de la cocina, emite la misma radiación que recibe. Si la olla está a una temperatura superior entonces emite más radiación de la que recibe. La radiación que llega a un objeto puede en parte ser absorbida o reflejada.

¿Qué hace para protegerse de la radiación en un día soleado: viste ropas de colores claros u oscuros? Un objeto de color negro absorbe casi toda la radiación que incide sobre él; pero, al mismo tiempo, es capaz de emitir toda la radiación que absorbió. Los cuerpos de color blanco, en cambio, tienen la propiedad de reflejar la radiación que incide sobre ellos. Por estas razones hay que vestir ropas blancas en días soleados.

Actividad

Consiga tres latas de refresco vacías, pinte una de blanco, otra de color naranja y otra de negro. Vierta en ellas agua hasta la mitad de su capacidad y expóngalas al Sol durante una hora. Compare la temperatura de cada lata.

Repita el experimento anterior con dos latas negras, pero ahora introduzca una de ellas en una bolsa transparente de plástico, sople dentro de ella y ciérrela con un nudo. De esta manera quedará aire en su interior. ¿Cómo cambia la temperatura del agua en cada lata?

Note que la bolsa de plástico deja pasar la radiación solar, pero impide las corrientes de convección, por lo cual se esperaría un aumento mayor de temperatura.

Otros cuerpos tienen la propiedad de absorber solamente parte de la radiación incidente, en tanto que el resto la reflejan. La propiedad que mide el porcentaje de la radiación que se absorbe a la que se refleja se llama *absortividad*. ¿Cómo serán, comparativamente, las absortividades de un cuerpo negro y de uno blanco?

Estos fenómenos se aprovechan en el diseño de calentadores solares, como el de la figura, que permite tener agua caliente día y noche, a temperaturas superiores a los 70 °C y un poco menores en días nublados.

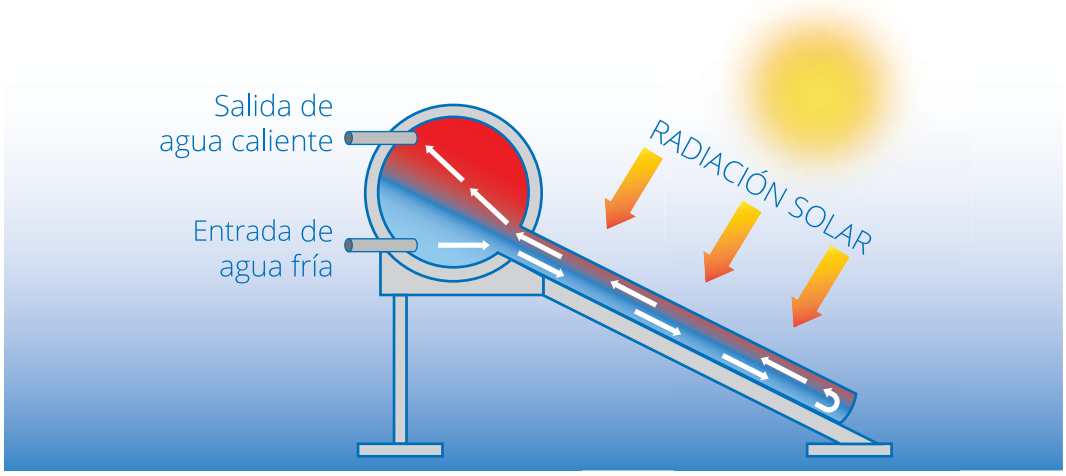


Figura 3-42. Calentador solar de 160 litros.

Los calentadores solares de tubos al vacío funcionan de la siguiente manera: el agua fría llena una serie de tubos paralelos. Éstos consisten en dos cilindros concéntricos; el exterior es de vidrio y el interior de metal pintado de negro. Entre ambos cilindros hay vacío, para evitar la pérdida de energía por la diferencia de temperatura entre el tubo y el aire de la atmósfera. El tubo interior, pintado de negro, absorbe eficientemente la radiación solar directa y difusa y se calienta, transmitiendo energía por *calor* al agua contenida en su interior. El agua caliente, por ser menos densa, sube a un tanque cilíndrico horizontal aislado térmicamente. Se construye así un ciclo de circulación de agua por convección, en el que agua fría baja y agua caliente sube al tanque aislado, almacenándose ahí para su uso posterior.

Cambios de estado; interpretación de la gráfica de presión-temperatura

Cambios de estado

Se vio que las sustancias ordinarias se encuentran en tres estados de agregación, sólido, líquido y gaseoso, dependiendo de la naturaleza e intensidad de las fuerzas interatómicas o intermoleculares, y las condiciones externas de temperatura y presión a que dichas sustancias se hallan sometidas.

Si se considera el caso de una sustancia muy conocida, como el agua, se sabe que puede estar en tres estados de agregación o fases, según la temperatura y la presión. Estas fases son la sólida (hielo), la líquida (agua) y la gaseosa (vapor).

Un experimento casero o de laboratorio permite ver la presencia de los tres estados y cómo el agua va pasando sucesivamente de uno a otro, coexistiendo algunos de ellos en el proceso.

Actividad

Extraiga varios cubitos de hielo del congelador, pártalos en pedazos más pequeños, viértalos en un recipiente de metal y agregue un poco de agua. Agite la mezcla de hielos y agua, midiendo la temperatura con un termómetro de mercurio, hasta que la temperatura medida a pocos centímetros de la superficie sea la misma que cerca del fondo del recipiente. ¿Qué observa mientras los hielos se funden? ¿Cambia la temperatura medida con el termómetro? Observe después lo que sucede con el agua resultante de la mezcla, una vez que el hielo ha desaparecido: ¿cambia su temperatura?

Al proceso en que la sustancia pasa del estado sólido al líquido se le llama *fusión*. El valor fijo de temperatura en que el sólido se funde se llama *temperatura de*

fusión. Al proceso inverso, en que el agua pasa de líquido a sólido, se le llama *solidificación*.

La temperatura de fusión depende tanto de la naturaleza de la sustancia, como de la presión. En general la temperatura de fusión aumenta al aumentar la presión; esto es válido para las sustancias que al derretirse aumentan de volumen, por ejemplo el hierro o el plomo.

El agua es uno de los casos especiales en que su temperatura de fusión disminuye al incrementar la presión. Esto se debe a que el hielo, al fundirse, disminuye su volumen.

Mientras los hielos se están fundiendo la temperatura de la mezcla no cambia, sin embargo ésta recibe energía continuamente por *calor* del aire. La energía que una unidad de masa de hielo recibe por *calor* para fundirse completamente, en estas circunstancias, se denomina *calor latente de fusión*. Su valor se expresa en unidades de energía por unidad de masa, es decir, $J/_{kg}$. A la presión de 1 atm el calor latente de fusión del agua es de unos 335 $^{kJ}/_{kg}$.

Actividad

Ponga ahora el recipiente de metal con agua al fuego. Todo el tiempo mida la temperatura del agua, hasta que empieza a hervir y durante este proceso. ¿Cuál es el comportamiento de la temperatura?

El agua pasa al estado gaseoso, o de vapor en su caso, al aumentar su energía interna por *calor* y, por tanto, su temperatura. Habrá notado, en la actividad anterior, que a partir de un cierto momento se empiezan a formar burbujas de vapor en el fondo, que se elevan por su menor densidad hacia la superficie. El agua hierve y, durante el proceso, no cambia el valor de la temperatura, a la que se denomina *temperatura de ebullición*.

Descripción microscópica. El agua, y cualquier líquido, puede convertirse en gas aunque no se energice por *calor*. Esto se debe a que los átomos y moléculas, al estar en incesante movimiento, tienen energías cinéticas que pueden ser muy pequeñas o muy grandes, con una variación casi continua entre ellas. Son los átomos y moléculas de energías cinéticas altas y, por tanto, grandes velocidades los que pueden romper las ligaduras entre ellos, escapando en forma de gas fuera de la superficie del líquido. Al proceso descrito se le llama *evaporación*.

Actividad

Observe la desaparición de una gota de agua sobre la superficie metálica de una cuchara. Aumente la temperatura del agua de la cuchara y trate de

determinar si el tiempo de evaporación aumenta o disminuye con el valor de la temperatura.

Actividad

Repita la actividad anterior, sometiendo el agua de la cuchara a la acción de un ventilador. ¿Qué observa respecto al tiempo de evaporación de la gota?

Ahora bien, en el proceso de ebullición se tiene que energizar a la sustancia continuamente por *calor*, pese a lo cual su temperatura no cambia. A la cantidad de energía que la unidad de masa de la sustancia recibe por *calor*, para pasar al estado de vapor, se la define como el *calor latente de ebullición*. Este *calor* vale para el agua a nivel del mar 2 257 $^{kJ}/_{kg}$.

Descripción microscópica. Algunos de los procesos y propiedades descritos pueden explicarse microscópicamente, de manera cualitativa, como sigue.

Conforme se aumenta por *calor* la energía interna del sólido, se incrementa la agitación de los átomos y las moléculas, de tal modo que los enlaces empiezan a debilitarse, dando como resultado el paso al estado líquido. Mientras la mezcla conserve partes sólidas, distribuidas de manera homogénea en el líquido, la energía suministrada se empleará en el paso de estas partes sólidas a líquidas, sin que se produzca una variación en la temperatura promedio de las moléculas que van pasando a la fase líquida.

Al derretirse, la distancia intermolecular promedio aumenta en general, dando como resultado un aumento en el volumen. En este caso, al elevar la presión a la que está ocurriendo la fusión, las moléculas no podrán separarse de los amarres fuertes que tienen en el sólido y la agitación tendrá que ser mayor para debilitar los enlaces, es decir, la temperatura de fusión incrementará. El agua es un caso excepcional porque, al pasar a líquido, la distancia intermolecular promedio disminuye (antes, siendo hielo, las moléculas están regularmente acomodadas de modo que ocupan un volumen superior a cuando están desordenadas). El aumento de presión ocasiona que la estructura se debilite y, por ello una agitación menor ocasiona el debilitamiento de los enlaces, dando paso a que se forme líquido a temperatura menor.

Actividad

Coloque un hilo largo sobre un pedazo de hielo, de modo que éste quede en el centro. Presiónelo jalándolo con firmeza de los extremos que quedan

de ambos lados del hielo. Verá que el hilo va cortando el hielo derritiéndolo, y que se solidifica de nuevo cuando pasa el hilo. Explique el fenómeno a partir de lo expuesto anteriormente.

Algo semejante ocurre con la constancia de la temperatura de ebullición, en que la energización por *calor* se emplea en la ruptura de los enlaces de las moléculas, ligadas en el líquido, y en su liberación por un incremento sustancial en su energía interna. Si la ebullición se efectúa a una presión mayor, ésta dificulta la liberación de las moléculas al aire; dando como resultado el que se tengan que agitar aún más las moléculas para romper sus enlaces en el estado líquido. Es decir, la temperatura de ebullición aumenta. Es un hecho que la temperatura de ebullición del agua sea menor a la altura de Toluca, que en Acapulco.

Otro cambio de estado ocurre cuando una sustancia, como el CO_2 pasa directamente de la fase sólida a la de vapor, sin pasar por la fase líquida (por eso se suele denominar "hielo seco" al dióxido de carbono en su estado sólido). A este proceso se le llama *sublimación*.

Como en los dos casos anteriores, la temperatura de sublimación es constante mientras la sustancia permanece en equilibrio en las dos fases. La explicación microscópica también es semejante. Asimismo, el *calor latente de sublimación* es la energía que por calor hay que suministrar a la unidad de masa de la sustancia para pasarla de la fase sólida a la de vapor.

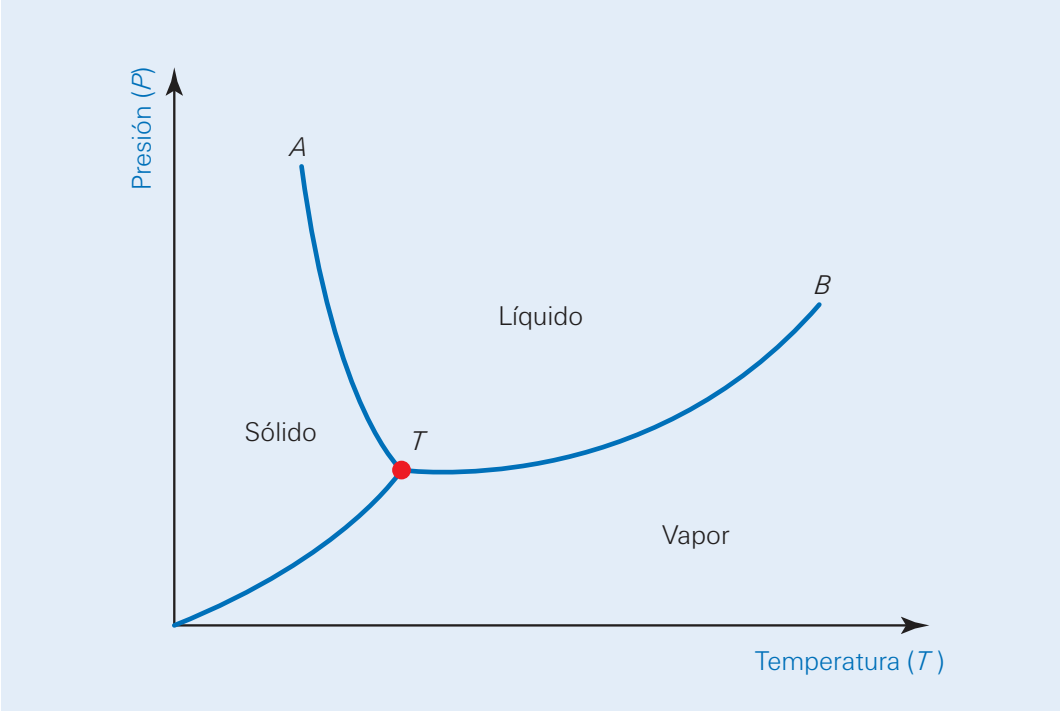


Figura 3-43. Diagrama general de estados o fases de una sustancia.

Gráfica de presión-temperatura

El comportamiento físico del agua se sintetiza en el diagrama presión-temperatura, de la figura 3-43. Las curvas en el espacio cartesiano *P-T* fueron obtenidas experimentalmente. Si se conocen la temperatura y la presión, el estado en que se halla la sustancia se puede ver en la figura.

Las curvas 0*T*, *TA* y *TB* corresponden a situaciones de presión y temperatura en que coexisten en equilibrio las fases sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor, respectivamente.

En la curva *TA* se hallan los valores de *P-T* que corresponden a la coexistencia de las fases sólida y líquida de la sustancia; por esto se la llama *curva de fusión*. El valor de la temperatura de cada punto corresponde a la temperatura de fusión y, como se ve, depende de la presión: la *T* de fusión aumenta si *P* aumenta.

La curva *TB* corresponde, por razones análogas, a la *curva de ebullición*, donde las fases líquida y de vapor están en equilibrio. Asimismo, la temperatura de ebullición aumenta con la presión.

El punto *T* es el *punto triple*, donde las tres fases se hallan en valores de *P-T* que hacen que las tres fases estén en equilibrio.

Sólo si la temperatura y presión del sólido se hallan debajo de las del punto triple es posible que el sólido pase directamente a la fase de vapor, sin pasar por el estado líquido.

Energía calorífica y sus transformaciones

Transformación de la energía calorífica

El trabajo termodinámico y su medición

Al energizar una porción de sustancia por *calor*, generalmente aumenta su temperatura; un efecto adicional es que también puede aumentar su volumen. Si se vierte agua en un recipiente y se calienta hasta alcanzar su punto de ebullición, su volumen aumenta; la expansión del vapor se efectúa en contra del aire.

Trabajo de un fluido

Supóngase que sobre la superficie del agua se coloca un pistón sin peso, de sección circular que empuja el aire hacia arriba. El diagrama de la siguiente figura muestra que el agua vence en su dilatación la fuerza externa del aire. La fuerza total que el vapor de agua ejerce contra el aire es el producto de su presión *P*, por el área *A* de la superficie de contacto con el pistón:

$$F = PA$$

Si el pistón se mueve hacia arriba una distancia $\Delta h = h_f - h_i$, siendo h_i la altura inicial y h_f la altura final de la superficie del pistón imaginario, el agua habrá realizado un trabajo, W, contra la atmósfera dado por:

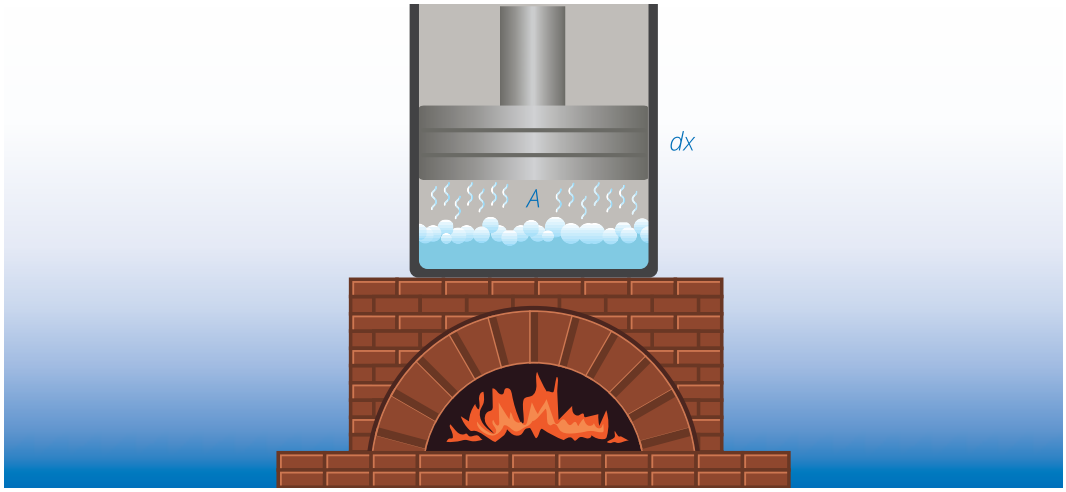


Figura 3-44.
Trabajo por presión.

$$W = F\Delta h = PA\Delta h = P\Delta V$$

El producto $A\Delta h$ no es más que el volumen de dilatación del agua, ΔV.

Primera ley de la termodinámica

Se tienen dos procesos que afectan la energía interna del agua, que la hacen cambiar en ΔU: por un lado el calor $Q = C\Delta T$ por la interacción con la flama que la aumenta, y por otro, el trabajo $W = p\Delta V$ que el agua efectúa contra la atmósfera al dilatarse, que la disminuye. Ambos efectos se toman en consideración en la siguiente ecuación:

$$\Delta U = Q - W$$

Esta ecuación, que gobierna los intercambios de energía de un objeto por *calor* y por trabajo, es la *primera ley de la termodinámica*. Se considera que el trabajo es negativo cuando el exterior realiza trabajo sobre el sistema y positivo cuando el sistema efectúa trabajo sobre el exterior.

La ecuación también se puede escribir, más apropiadamente, como sigue:

$$\Delta U = \Delta U_Q + \Delta U_w$$

ΔU_Q representa el cambio en la energía interna debido al proceso de *calor*, en tanto que ΔU_W se refiere al cambio en la energía interna debido al proceso de trabajo. Ambos términos coinciden, cuantitativamente, con Q y W, respectivamente.

La ecuación se aplica para un fluido descrito por sus variables de volumen, presión y temperatura. Puede ser, por ejemplo, vapor de agua o aire encerrado en un cilindro provisto de un pistón. En este caso, la presión interna del gas debe

ser suficiente para generar una fuerza capaz de contrarrestar el peso del pistón y el del aire por encima de él. El trabajo de expansión será nuevamente calculado por $P\Delta V$. El signo negativo W corresponde a la convención que asocia un signo positivo al trabajo cuando el sistema lo realiza sobre el exterior, y negativo en caso contrario, es decir, cuando un agente externo efectúa trabajo sobre el sistema. En este caso, el vapor al expandirse hace trabajo contra la atmósfera, por lo que W es positivo y, al restarse en la ecuación, significa que dicho trabajo se efectúa a expensas de su energía interna. Asimismo, Q se considera negativo si el sistema pierde energía interna por *calor* con otro objeto, y positivo si el sistema gana energía por *calor* de otro cuerpo.

Descripción microscópica

Desde el punto de vista microscópico clásico, la energía interna U de todo sistema termodinámico, en particular del agua, está relacionada con el movimiento de sus componentes moleculares, aunque también con la energía potencial de unas moléculas respecto a las otras.

Entonces, cuando U cambia, por calor o por trabajo, varían tanto la energía de movimiento de las moléculas (influyendo en el cambio de temperatura) como el valor promedio de la posición de ellas con respecto a su centro de masa (cambio asociado, a su vez, con la variación del volumen del objeto).

En un gas monoatómico (formado por moléculas de un solo átomo), U se compone de la suma de las energías cinéticas $\frac{1}{2}mv_i^2$, en donde m es la masa de la molécula y v_i es la rapidez con que se mueve. En el agua, U consta de la energía cinética de sus moléculas, sumada a la energía potencial asociada a las fuerzas intermoleculares.

Cuando un campo electromagnético de microondas hace vibrar a las moléculas de agua, es necesario sumar a U la energía del movimiento vibratorio de las moléculas. El agua en una olla sobre una flama se calienta por transferencia de energía por *calor*. ¿Cómo se calienta el agua en un horno de microondas? ¿Por *calor* o por trabajo?

Cuando el agua entra en ebullición, la temperatura permanece constante; ya que la energía que la flama le proporciona por *calor*, se invierte en romper los enlaces de las moléculas del líquido, y éstas escapan en forma de vapor, efectuando también trabajo expansivo en contra de la atmósfera. Mientras quede líquido por evaporar, su temperatura se mantiene constante. La temperatura de ebullición depende también de la altura sobre el nivel del mar. La presión del aire por encima de la olla impide el escape de las moléculas; como la capa de aire en la Ciudad de México es menor que en Acapulco, el agua hervirá a una temperatura menor en la capital (94 °C), que en la costa (100 °C).

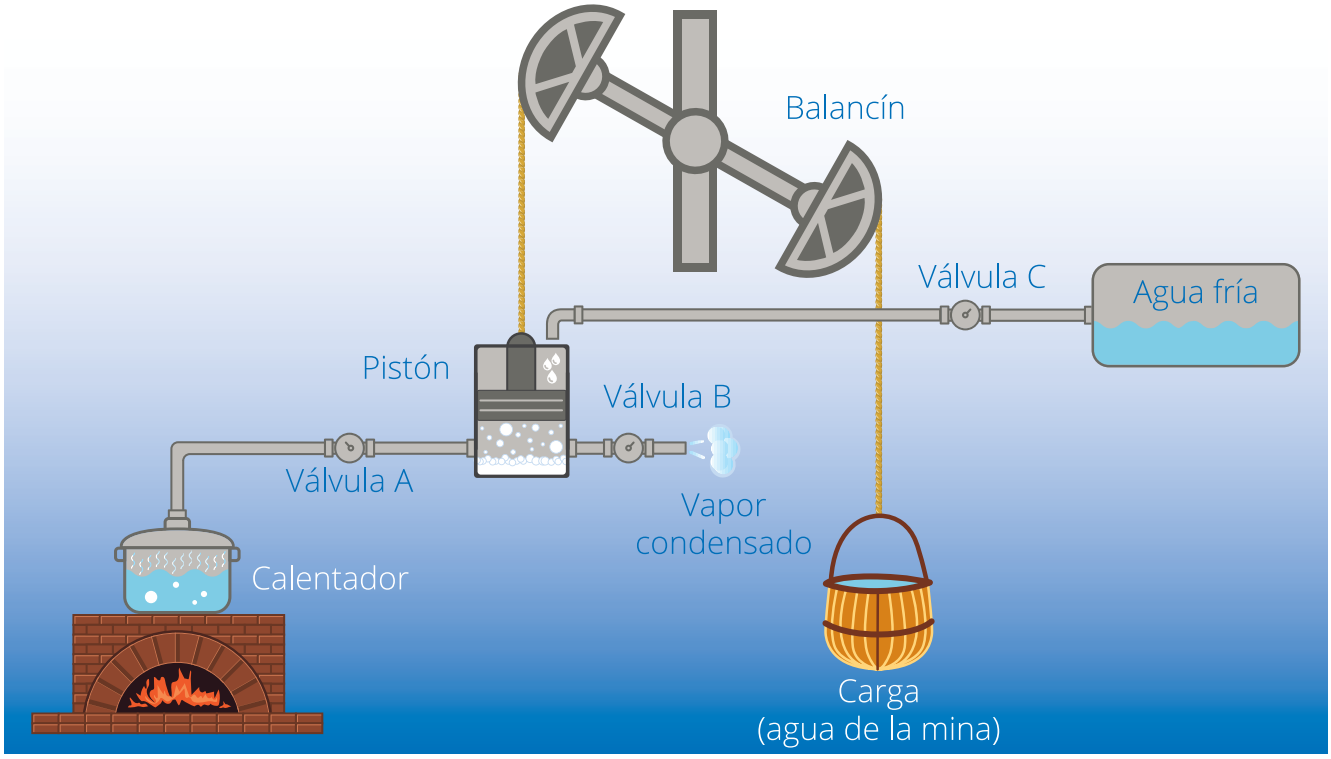
Si ahora se calienta agua en una olla cerrada (*olla de presión*), la presión aumenta dentro de ella, de modo que el agua alcanza temperaturas mayores a la de ebullición al aire libre. Si se logra mantener la temperatura alta, a fuego lento, dejando escapar un mínimo de vapor para que el recipiente no explote, se puede cocer un alimento en menos tiempo, empleando menos combustible que cocinando en una olla abierta.

Los motores térmicos en la historia. Newcomen y Watt

El diseño de las termoeléctricas modernas viene de los primeros motores térmicos europeos del siglo XVII, los cuales transformaban calor en trabajo. La figura 3-45 muestra una representación del motor de Newcomen (1663-1729), inventor inglés, quien se dedicó a resolver el problema de cómo obtener trabajo mecánico a partir de la quema de combustibles, para aplicarlo en la explotación de las minas de carbón, y en la extracción del agua de las mismas. Posteriormente, este motor se comenzó a utilizar en las múltiples tareas de las fábricas de hilados, tejidos, etcétera.

Se muestra en el siguiente esquema el funcionamiento del motor de Newcomen: si las válvulas *B* y *C* están cerradas y se abre la válvula *A*, entrará vapor caliente de la caldera, éste empuja al pistón hacia arriba, moviendo el balancín para subir una carga de agua o de carbón desde el fondo de la mina. Cuando el pistón se encuentra en la parte superior del cilindro, se cierra la válvula *A* y se abre la *C*, vertiendo agua fría sobre el cilindro y el pistón. Este enfriamiento condensa al vapor del interior del cilindro, disminuyendo su presión por debajo de la presión atmosférica, haciendo que el pistón se mueva hacia abajo. Se abre la válvula *B* y el vapor residual escapa al exterior. El ciclo comienza de nuevo al abrirse la válvula *A*, para dejar entrar vapor otra vez, estando las válvulas *B* y *C* cerradas, y así sucesivamente.

Figura 3-45.
Motor Newcomen.



La eficiencia del motor de Newcomen no pasaba de 1 o 2%, por varias razones, una de ellas era que el ajuste entre el pistón y las paredes del cilindro era muy deficiente, tanto que una moneda podía caber en el espacio intermedio. Pero fue Watt quien descubrió la causa principal de la ineficiencia. Él estudió un modelo a escala del motor de Newcomen y descubrió que los calentamientos y enfriamientos sucesivos del cilindro y el émbolo podían evitarse separando la operación de condensación, evitando así la necesidad de que en una misma parte del motor se efectuaran las dos operaciones de calentamiento y enfriamiento. Su propuesta se esquematiza en la siguiente figura.

Estando la válvula *B* cerrada se abre la *A*, entrando vapor caliente al cilindro. Esto ocasiona que el émbolo se mueva hacia arriba, empujando al balancín para elevar la carga, o realizar otras tareas. Después se cierra la válvula *A* y se abre la *B*, dejando salir vapor al condensador. En seguida se abre de nuevo la válvula *A*, cerrando la *B* y el ciclo se repite. Watt, con su motor, fue capaz de elevar la eficiencia del motor de Newcomen hasta un valor del 7%, es decir, un factor superior a 3.

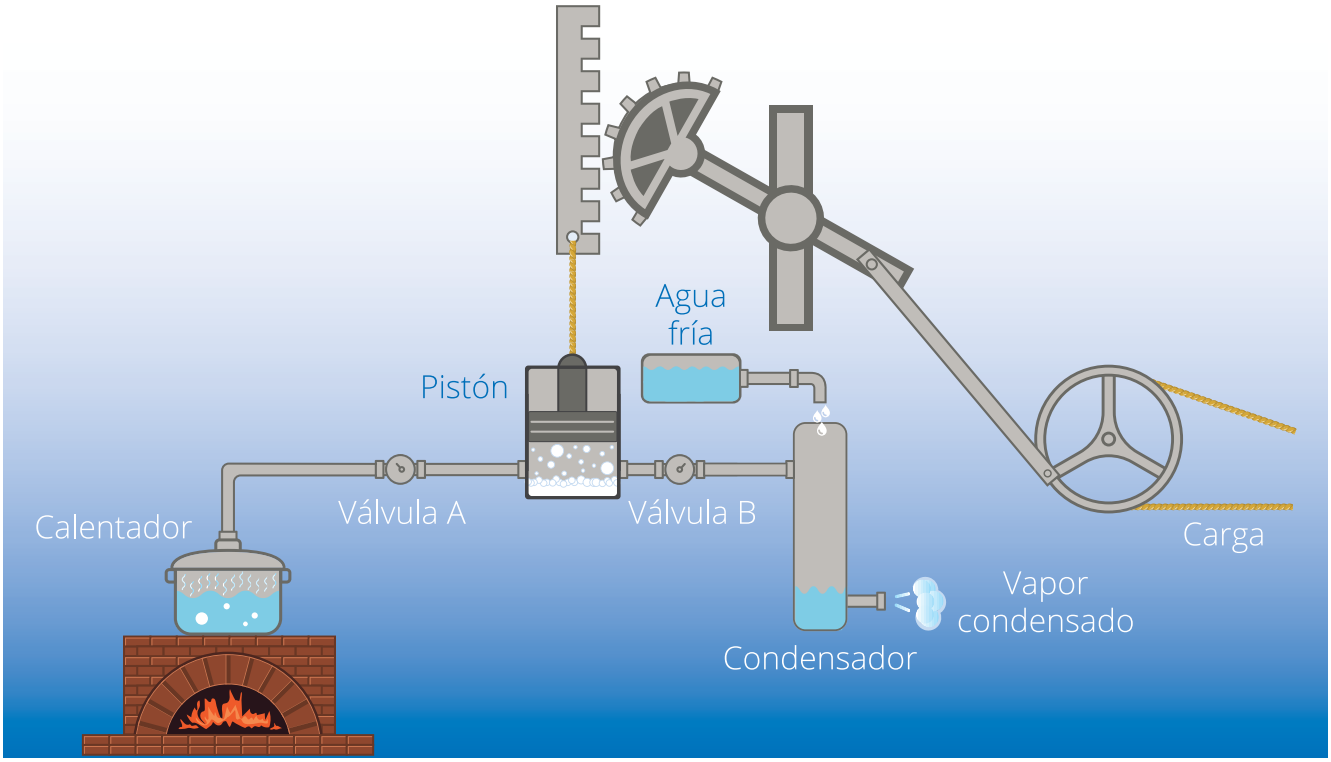


Figura 3-46.
Máquina térmica de Watt.

Veamos lo que escribía el francés Sadi Carnot en 1824, el gran teórico de los motores térmicos, a propósito de la importancia de su desarrollo:

"El servicio más relevante que el motor térmico ha hecho en Inglaterra es sin duda el de haber reanimado la explotación de sus minas de hulla, que había

Figura 3-47.
Extracción de carbón.

disminuido y que amenazaba con extinguirse completamente a causa de la dificultad siempre creciente para el desagüe y la extracción del combustible (la extracción de hulla se multiplicó por diez, sucediendo algo semejante con otros minerales, tanto en Europa como en el Nuevo Mundo). Se deben colocar en segundo lugar los servicios prestados a la fabricación del hierro, tanto por la hulla que se ofrecía en abundancia como sustituto de la madera cuando ésta empezaba a agotarse, como por las potentes máquinas de toda clase, cuyo uso permitió o facilitó el empleo del motor térmico."

Y, más adelante, dice Carnot:

"Quitar hoy a Inglaterra sus motores térmicos, sería arrebatarle la hulla y el hierro al mismo tiempo; esto equivaldría a agotar todas sus fuentes de riqueza y arruinar todos sus medios de prosperidad; eso significaría aniquilar esta potencia colosal."

Potencia y trabajo de los motores térmicos

Uno de los problemas era que la extracción del carbón de las minas se tenía que hacer desde el subsuelo, pues para entonces ya se había agotado el carbón superficial, con el agravante de que la perforación penetraba las capas freáticas y las minas se inundaban. Era necesario extraer el agua y el carbón simultáneamente con rapidez suficiente, es decir, se necesitaba elevar desde el fondo de la mina (a una profundidad h) una cierta cantidad de agua de masa m, en un tiempo t, para permitir la extracción de carbón.

Según lo expuesto en el capítulo de mecánica, se debería poder desarrollar una potencia:

$$P = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} = \frac{mgh}{t}$$

Para tener una idea cuantitativa supongamos que, en el desagüe de una mina, se eleva una tonelada de agua desde una profundidad de 20 metros en un minuto, la potencia mínima que se tendría que desarrollar es:

$$P = 1\,000 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 20 \text{ m}/60 \text{ s} = 3\,267 \text{ W}.$$

Un aparato que puede desarrollar una potencia considerable sería un automóvil de unos 100 *caballos de potencia* (HP). La conversión de HP a watt es de:

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}.$$

Por tanto, la potencia en watts del motor de un automóvil de 100 HP, es de 100 HP = 100 × 746 W = 74 600 W, más de veinte veces la potencia que se necesita en la tarea del desagüe.

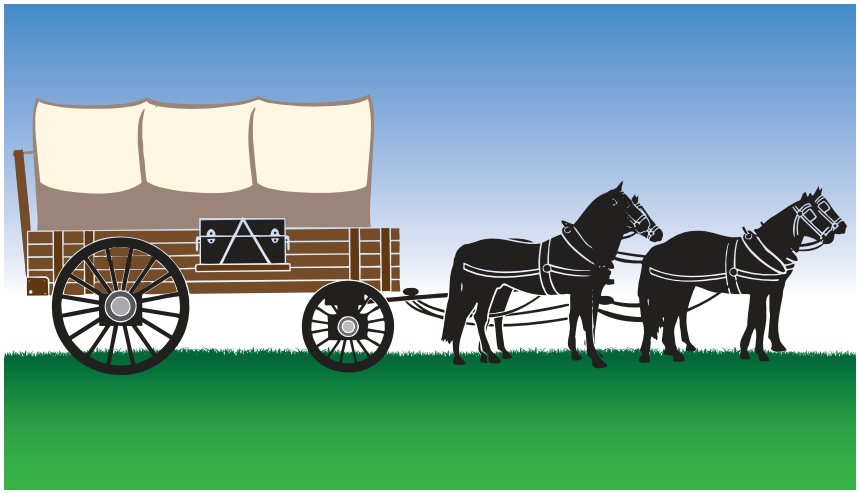


Figura 3-48. Un automóvil de cuatro caballos de potencia.

El "caballo de potencia" y la empresa de Boulton-Watt

¿Por qué a la unidad de potencia se le llamó *caballo de potencia*? Quizá tenga mucho que ver una cláusula del contrato que Boulton y Watt hacían firmar a los clientes a quienes vendían los servicios de sus motores térmicos. Boulton se había asociado con Watt para vender "energía", ya que según ellos *"todos querían, energía"*. Una parte medular del contrato decía lo siguiente:

> *[...] Nuestra firma, Boulton y Watt, instalará la máquina, libre, gratis y por nada en su mina. La haremos funcionar durante los primeros cinco años, y todo lo que pedimos a cambio es una tercera parte de la diferencia entre el costo del carbón para nuestra máquina y el costo del forraje para los caballos que tendrían que realizar la misma cantidad de trabajo.*

Lo que pedían Boulton y Watt era:

$$\frac{1}{3}\text{(costo del forraje – costo del carbón), para realizar el trabajo W.}$$

En el párrafo aparecen dos términos que requieren de una definición precisa, además de un procedimiento riguroso para medirlos con precisión: el trabajo desarrollado por un caballo y el trabajo desarrollado por el motor térmico construido por la compañía, así como las cantidades de carbón y forraje consumidas cuando ambos trabajos son iguales. La cantidad de carbón necesaria para elevar una cierta cantidad de agua (o de carbón) de una cierta profundidad, podía calcularse mediante pruebas directas con el motor, sin embargo, el cálculo de la cantidad de forraje que se requeriría para que el caballo hiciera el mismo trabajo era más complicado. Watt realizó el siguiente experimento: ató una cuerda a un cuerpo de masa *m*, la introdujo en un pozo de profundidad *h*, hizo pasar la cuerda por una polea situada en la boca del pozo y luego la amarró al arnés de un caballo. Ajustó *m*, *h* y el tiempo de elevación para saber la potencia máxima ($P_{máx}$) a la que el animal podía trabajar durante un cierto lapso de tiempo *t* sin cansarse, de modo que la $P_{máx}$ adquirió un valor cercano al que ahora conocemos, que es de 746 W.

Quienes estaban relacionados con la explotación y venta del carbón tenían que comprender los términos de la transacción; para lo cual fueron requeridos los conceptos de *cantidad de trabajo* y los de *potencia* y *energía* (ahora comunes en la física).

Un concepto fundamental necesario para definir la operación de un motor térmico es su *eficiencia* (representada por la letra griega "eta": η). La eficiencia es el cociente del trabajo obtenido del motor entre la cantidad de energía por calor que recibe de la caldera.

La operación del motor de Newcomen satisfizo desde el principio a sus usuarios. Sin embargo, en la medida en que el costo del carbón aumentaba, se hacía necesario obtener más trabajo a partir de la misma cantidad de carbón, es decir, era necesario aumentar la eficiencia.

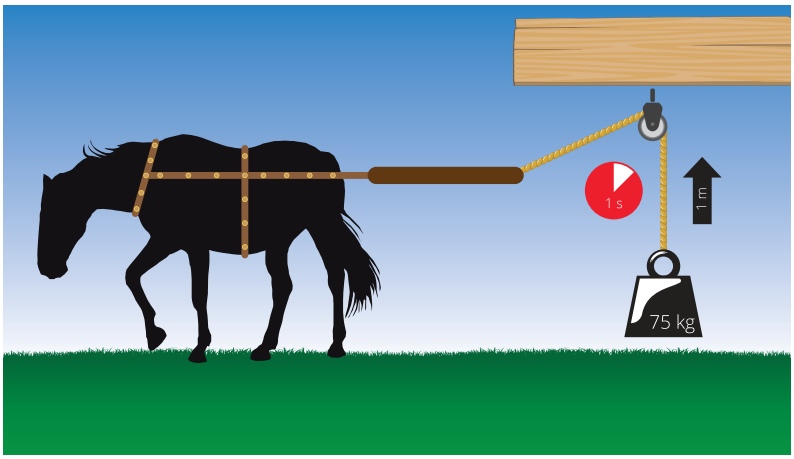


Figura 3-49. Experimento de Watt para medir el "Caballo de Potencia (HP)".

Por eso, el desarrollo de motores térmicos continuó y James Watt (1736-1819) produjo una revolución en su funcionamiento.

Implicaciones de la obtención y aprovechamiento de la energía en las actividades humanas

Degradación de la energía

Antes de ver el concepto de desarrollo sustentable, conviene considerar otro aspecto de la energía, que tiene que ver con su *degradación*. Esto es, aunque la energía es una cantidad que se conserva cuando un objeto experimenta un proceso, puede suceder que se degrade. *El concepto de degradación se refiere a la pérdida de la capacidad para realizar trabajo sobre el exterior del objeto*. Considérese un sistema aislado del exterior, en el estado inicial (*i*), compuesto de dos partes separadas por una pared removible, una con gas y la otra al vacío. Si se elimina la pared, el gas se precipita sobre el vacío, después de un tiempo se llega al equilibrio, en el estado final (*f*). La primera *ley de la termodinámica*, aplicada al sistema que pasa del estado inicial al final, establece que:

$$\Delta U = U_f - U_i = Q - W = 0 - 0 = 0,$$

por lo que

$$U_f = U_i$$

La energía interna del gas es la misma en el estado inicial que en el final. Pero la gran diferencia es que en el estado inicial *i*, el sistema puede realizar un trabajo sobre el exterior, en tanto que en el estado final *f*, tal posibilidad ha desaparecido, se ha destruido o consumido.

En otras palabras, en *i*, el sistema posee *exergía*, pero en *f* se ha consumido. En resumen, se puede decir que mientras la energía se conserva, la exergía se destruye. Pero también se puede establecer que del estado *i* al estado *f* la energía se ha degradado. Esta última afirmación constituye el llamado *principio de degradación de la energía*.

Suele decirse que "energía es la capacidad para realizar un trabajo", pero el ejemplo demuestra que tal afirmación no es válida; sólo es válida para la exergía. La energía inicial es igual a la final, pero en la primera situación tiene capacidad para realizar trabajo (exergía), mientras que en la segunda no.

Desarrollo sustentable

En 1987 la Comisión Internacional sobre Ambiente y Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas definió como *desarrollo sustentable* el que

"[...] satisface las necesidades y aspiraciones del presente sin comprometer la capacidad para satisfacer las del futuro".

Para conseguir la sustentabilidad es necesario (aunque no suficiente) que la contaminación exagerada que el planeta sufre actualmente sea drásticamente reducida, lo que implica un cambio en la forma como se vienen procesando los recursos minerales, energéticos, nutrientes (nitratos y fosfatos, entre otros) y el agua.

Uso lineal y cíclico de los recursos exergéticos

Para entender uno de los meollos de la sustentabilidad supóngase que un estudiante es sorprendido al inicio de sus estudios por dos noticias. La mala es que el pariente cercano que le apoyaba sistemáticamente con los gastos de manutención y escolares de sus estudios fallece; pero la buena noticia es que le deja una cantidad que, como inversión en manos de una institución financiera, le genera intereses suficientes para seguir cubriendo los gastos que anteriormente le asignaba.

Ante el estudiante se abren dos opciones: la sustentable y la no sustentable. En la primera adapta el gasto para la satisfacción de sus necesidades a los intereses que recibe por su dinero. En la opción no sustentable (o insostenible) adquiere necesidades que implican gastos mayores a los intereses, y comienza a extraer dinero del capital; al cabo de un tiempo su situación es insostenible.

En la figura 3-50 se muestra el paradigma actual hegemónico de la humanidad, en que se vive del capital, y no de los intereses. El capital fijo (el depósito *B*) son los combustibles fósiles (carbón y petróleo) y el uranio, así como los depósitos de minerales; es decir, *B* son los recursos agotables, mineros y energéticos.

El capital fluyente, los intereses, está constituido por los ciclos de nutrientes (como el nitrógeno y el fósforo), agua y energéticos inagotables (o renovables) movidos por el Sol (es el ciclo *A*, que se ve muy deteriorado por la contaminación). La humanidad afecta a *A* por el uso masivo de energéticos agotables.

El paradigma es *lineal* en la utilización de los recursos porque las actividades humanas, representadas por la persona de la figura, recogen recursos del capital fijo (2) y del variable (3), los procesan y los devuelven al ambiente (1) en forma de contaminantes gaseosos (5), líquidos y sólidos (4).

Figura 3-50. Vivir del capital o el paradigma de la utilización lineal de los recursos.

A este esquema de insostenibilidad, se opone el paradigma de la utilización *cíclica* de los recursos, como se indica en la figura 3-51.

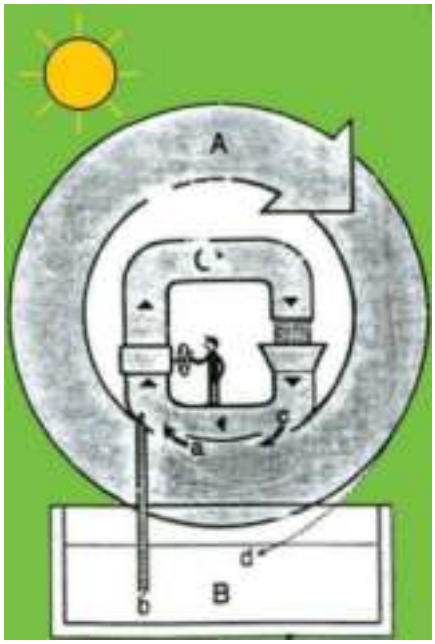


Figura 3-51.
Vivir de los intereses o el paradigma de la utilización circular de los recursos.

En este paradigma la actividad humana se "engarza" en el punto (*a*) con los ciclos naturales-solares de circulación de nutrientes, agua y energéticos (*A*) que, al ser reciclados en *C* luego de ser utilizados, regresan a *A* en (*c*), sin dañarlo. El uso que se hace de los recursos agotables de *B* es mínimo. De este modo se logra que la humanidad tenga un modo sostenible de subsistencia con el ambiente.

La satisfacción de las necesidades humanas es resuelta con el consumo de exergías suministradas en los accesos (*a*), provenientes de las exergías naturales *A* creadas a diario por el Sol.

Un ejemplo es la utilización de la exergía del agua: el Sol evapora el agua del suelo y lo eleva a la atmósfera. Por lluvia el agua se deposita a una altura superior a la del suelo, adquiriendo exergía hidráulica. Ésta es almacenada en una presa y es utilizada para el riego, o para generar electricidad, volviendo después a niveles inferiores, de donde el Sol vuelve a evaporarla, y así sucesivamente.

Sin embargo, si el agua regresa al mar o a los lagos con una carga excesiva de nutrientes químicos, provenientes de la fertilización de los suelos agrícolas o de contaminantes de los herbicidas e insecticidas, el ciclo no se cierra limpiamente y se ve maltrecho como en la figura 3-50.

Huella ecológica

Otra forma práctica de especificar científicamente la sustentabilidad de un conglomerado humano en la superficie del planeta es mediante el concepto de *huella ecológica*.

Ésta se establece, como se hizo por ejemplo en el municipio (comuna) de Malmöhus en Suecia, al comparar los recursos consumidos y el desperdicio producido en la satisfacción de las necesidades del municipio, con la capacidad de absorción de estas demandas y de su regeneración, manteniendo para ello un mínimo de 12% de la superficie del municipio con el fin de preservar la biodiversidad natural.

El concepto así definido es verdaderamente multidisciplinario, ya que integra conocimientos de física, biología, química, etc. Esto es debido a lo complejo del sistema sociedad-ambiente, que es una unidad indisoluble.

En este sentido, la huella ecológica ofrece un método de evaluación de la capacidad del conglomerado humano para sostener un estilo de vida compatible con un estado saludable de plantas y animales del ambiente, acorde con el paradigma de la utilización circular de los recursos.

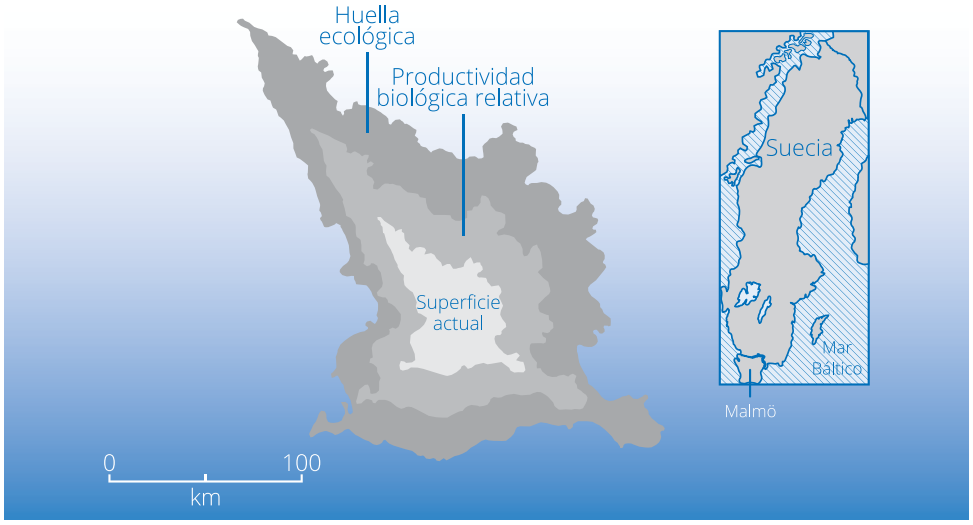


Figura 3-52.
La huella ecológica del municipio sueco de Malmöhus.

La huella incluye el consumo de energía, alimentos, vestido y otras necesidades de la población, así como los desperdicios que se generan. Los desperdicios son principalmente dióxido de carbono absorbido por el crecimiento de bosques permanentes, y nitratos y fosfatos de los drenajes y residuos de los fertilizantes agrícolas, filtrados por los humedales y asimilados por plantas y microorganismos que protegen los suministros de agua dulce y ecosistemas acuáticos.

La huella también toma en cuenta el balance entre la importación y exportación de consumibles y el desperdicio producido por ellos, de manera que incorpora el uso de tierra y océano fuera de las fronteras de Malmöhus.

El número de hectáreas del municipio entre el número de habitantes es de 1.2 $^{\text{hectáreas}}/_{\text{hab}}$, y son tan productivas biológicamente que corresponden a 3.4 hectáreas de tierra de productividad global promedio. Cuando se quita el 12% de esta superficie para mantener la biodiversidad, quedan 3.0 hectáreas de tierra de productividad global promedio disponibles para cada habitante.

Sin embargo, la huella ecológica sueca es de 7.2 hectáreas de tierra de productividad global promedio, de modo que la superficie de otras partes debe utilizarse para compensar la diferencia de 4.2 hectáreas por cada persona de Malmöhus. Esta diferencia representa el déficit ecológico de Malmöhus, como se expresa en la figura 3-52.

Afortunadamente para los suecos, 8.2 hectáreas de tierra de productividad global promedio por persona están disponibles después de sustraer 12% para preservar la diversidad biológica.

Sin embargo, si todas las naciones adoptaran el estilo de vida sueco de 1997, la capacidad de la Tierra sería excedida por un factor de tres.

Las estimaciones a nivel mundial revelan que la huella ecológica actual está excedida en una tercera parte de la superficie de la Tierra.

Consumo de recursos energéticos agotables

La gran dependencia actual de los recursos energéticos agotables, es decir, de los recursos fósiles provenientes del depósito *B* de la figura 3-50, es una manifestación de que el paradigma insostenible está firmemente asentado en nuestra civilización. A continuación se analiza la secuencia temporal de la consolidación del paradigma de la utilización lineal de los recursos energéticos.

Alrededor de 1880 se extrajeron unas cuantas toneladas de petróleo, que llegaron a ser unos 50 millones de toneladas por el año de 1950. A partir de entonces, el crecimiento de la producción ha sido casi exponencial, hasta alcanzar poco más de 3500 millones de toneladas en el año 2000.

Aparte de la contaminación que el uso del petróleo produce, está el problema de su agotamiento. Si no hay un cambio pronto, el peligro de guerras por este energético estará presente.

Se trata de un escenario insostenible porque a la tasa de explotación del año 2000 sólo quedaría petróleo para 38.4 años y gas para 62 años. Aunque el carbón alcanzaría para unos 227 años, al acabarse el petróleo y el gas su tasa de explotación aumentaría, de modo que duraría mucho menos. Pero además el carbón produce más gases de efecto invernadero que el petróleo y el gas.

La sujeción social al paradigma de la utilización lineal de los recursos es la responsable de que la huella ecológica mundial exceda la superficie del planeta en una tercera parte. La huella ecológica promedio mundial es de 2.8 hectáreas por persona, en tanto que la biocapacidad disponible en hectáreas por persona es de 2.1.

Sin embargo esta huella está muy diferenciada entre naciones. Por ejemplo, Canadá utilizó en 1997, 7.0 hectáreas por persona de tierra productiva promediada globalmente y 0.7 hectáreas de océano productivo, para un total de 7.7 hectáreas por persona, mientras que su sustentabilidad disponible es de 9.6 hectáreas por persona. En Estados Unidos, en cambio, la persona promedio requirió de 10.3 hectáreas, pero su sustentabilidad es de 6.7 hectáreas por persona. Así, Canadá tiene un margen positivo en sustentabilidad de 1.9 hectáreas por persona, en tanto que Estados Unidos sobrevive con un déficit de 3.6 hectáreas por persona, que explota de los demás.

En México también somos deficitarios, es decir, nuestro modo de vida es no sustentable, pues nuestra huella ecológica es de 2.6 hectáreas por persona, en tanto que nuestra biocapacidad disponible es de apenas 1.4 hectáreas por persona.

Los energéticos renovables

Los energéticos renovables provenientes directa o indirectamente del Sol son los intereses o capital fluyente generados por el gran astro luminoso. La ventaja sobre las otras opciones es que no contaminan tanto, son potencialmente inagotables y además utilizables no sólo en la generación de electricidad, sino en el transporte, la industria y la agricultura.

Su difusión masiva tendría un efecto amplio en la disminución drástica de los gases de efecto invernadero, y sin duda implicarían una gran reducción de la huella ecológica planetaria. El ritmo de crecimiento de la capacidad instalada de energéticos renovables generadores de electricidad presenta un panorama optimista, tanto que, de desarrollarse a ritmos tan acelerados, puede significar el abandono de los combustibles fósiles en un futuro no muy lejano.

En la tabla siguiente se muestran las contribuciones de los energéticos renovables en la generación de electricidad, para los años 2005, 2006 y 2007, en GW, en el mundo. (Recuérdense dos aspectos: *1)* que 1 GW de capacidad instalada es aproximadamente la capacidad de nuestra hidroeléctrica más grande, que es Chicoasén, en Chiapas; *2)* la capacidad total eléctrica instalada en el mundo en 2003 era de 3 641.3 GW, repartidos así: 2 469.9 GW (68%) en termoeléctricas de combustibles fósiles; 368.5 GW (10%) en nucleoeléctricas; 739.8 GW (20%) en hidroeléctricas.

Tabla 3-3. Contribuciones de los energéticos renovables en la generación de electricidad

Energético renovable	2005	2006	2007 (estimado)
Capacidad total instalada (excluye hidro)	182	207	240
Capacidad total instalada (incluye hidro)	930	970	1010
Capacidad eólica instalada	59	74	95
Fotovoltaica conectada a la red eléctrica	3.5	5.1	7.8
Producción fotovoltaica (anual)	1.8	2.5	3.8

A los valores de esta tabla se pueden agregar, al menos para el año 2006, otras fuentes renovables e inagotables (como la geotermia) de energéticos generadores de electricidad (también en GW): pequeñas hidroeléctricas, 73; biomasa, 45; geotérmica, 9.5; solar térmica, 0.4; energía de mareas, 0.3. Con éstas y las de la tabla, el total de renovables y geotermia es de 207 GW.

Las grandes hidroeléctricas contribuyen con 770, y la capacidad eléctrica total mundial, para el año 2006, era de 4 300 GW.

La energía eólica ha sido la de mayor crecimiento en proporción en cuanto a capacidad instalada, como se muestra en la tabla. Se espera que tal impulso se mantenga pues se supone un avance de unos 15 GW instalados anualmente al final de 2006, a 33.5 GW anuales para 2011. Aunque la proporción de la capacidad instalada de renovables respecto al total es de una cuarta parte, si se incluyen

las grandes hidroeléctricas, el ritmo de avance es muy rápido y sostenido. Desde mediados de la década de los setenta varios grupos e investigadores propusieron que las grandes reservas probadas de hidrocarburos (unos 70 000 millones de barriles de petróleo) podrían ser utilizadas para financiar y apoyar energéticamente la transición mexicana a las fuentes inagotables de energéticos, desarrollando para ello nacionalmente las técnicas correspondientes.

Ahora bien, las técnicas de los energéticos eólicos y fotovoltaicos son desarrolladas por los países altamente industrializados, entre los que aparecen China e India, pero no México por desgracia. Se perdió así una oportunidad especial para acceder a la independencia técnica en energéticos.

Ni China ni India tienen suficiente petróleo que les sirva de apoyo a una transición a los energéticos inagotables, como se propuso para nuestro país, pero sí cuentan con una política científica y técnica decidida que los tiene en el lugar que ocupan. Esto lo podría también lograr México, aún sin petróleo, de contar con una política científico técnica y energética pertinente. En una opción, las instituciones de educación superior e investigación científica (universidades y tecnológicos) bien podrían intentar desarrollar prototipos técnicos energéticos y difundirlos socialmente, bien a través de empresas propias, en asociación con gobiernos y empresarios o con cooperativas.

Ecoaldeas y ecomunicipios

Desde hace cuatro décadas se ha difundido en varios países el concepto y la construcción de ecoaldeas y ecomunicipios. Entre estos intentos resalta por su perseverancia y claridad de planteamiento el caso sueco, en el que explícitamente se busca poner en práctica como paradigma de vida el de la utilización cíclica de los recursos exergéticos.

A pesar de los años transcurridos, los habitantes de las ecoaldeas aún en funciones reconocen no haber llegado a la meta; sin embargo, persisten en ello, por los logros alcanzados, en que la solidaridad humana es una ganancia efectiva y enriquecedora. Al parecer, en las ecoaldeas se pone de manifiesto que las relaciones armónicas entre la sociedad y el ambiente conducen a relaciones humanas armónicas en el interior de la sociedad.

Una de las ideas centrales del paradigma de la figura 3-51 es el reciclaje de nutrientes, agua y energía. Su consecución requiere de la efectiva cooperación entre los habitantes de la ecoaldea. En la página "Tuggelite", el lector encuentra la historia del movimiento de ecoaldeas y ecomunicipios (en Suecia el equivalente del municipio en nuestro país es la comuna).

Se sugiere que una de las primeras acciones a tomar en el intento de transformar cualquier municipio en un municipio ecológico podría ser la de reciclar la basura en una planta construida ex profeso, con biodigestor incorporado. Las consecuencias serían inmediatas: educación ecológica de los habitantes, ofrecimiento costeable de abono orgánico a los agricultores de la región, producción de gas metano para estufas domésticas y eventualmente calentadores de agua.

En realidad, habría que analizar la factibilidad social, política y económica del establecimiento del paradigma de la utilización circular de los recursos en varios niveles de acción. Los niveles tienen dos componentes: el espacial geográfico (e_i) y el temporal (t_i).

El componente espacial tiene cinco instancias: hogar, aldea, pueblo o municipio, región, país y planeta. El componente temporal tiene tres: corto, mediano y largo plazo. De ambos componentes se definen 15 niveles de acción hacia la sustentabilidad: hogar, corto plazo; hogar, mediano plazo; planeta, mediano plazo; planeta, largo plazo, etcétera.

Como se aprecia, los quince niveles están interconectados, pues no se puede tener un planeta sustentable al largo plazo si no se consigue que todos los hogares lo sean al corto plazo. A veces, algo parecido a lo anterior se dice de otra manera: "Pensar globalmente y actuar localmente".

Actividad

Calcule aproximadamente su huella ecológica considerando solamente (por simplicidad) su alimentación diaria.

4 | Manifestaciones de la estructura interna de la materia

Explicación de los fenómenos eléctricos: el modelo atómico

Proceso histórico del desarrollo del modelo atómico: aportaciones de Thomson, Rutherford y Bohr; alcances y limitaciones de los modelos

Desde el tiempo de los griegos, el hombre se preguntaba cómo están constituidos todos los cuerpos que forman la naturaleza. Si un cuerpo se divide en dos, y estas dos mitades también se dividen para formar cuatro y así se continúan produciendo cuerpos cada vez más pequeños, ¿llegará el momento en el que no se puedan dividir más? O ¿se puede continuar el proceso infinitamente? Platón y Aristóteles eran partidarios de la idea de que la materia es infinitamente divisible. A diferencia de ellos, un filósofo que no compartía esas ideas fue Demócrito, quien sostenía que la materia se compone de partículas indivisibles a las que llamó *átomos*.

Sin embargo, al no poderse comprobar ninguna de las dos teorías, la de Platón y Aristóteles fue la más aceptada y gozó de popularidad en aquel momento. No fue sino hasta principios del siglo XIX cuando, debido a la acumulación de experiencias cada vez más contundentes, se cuestionó la teoría de la materia infinitamente divisible y resurgió la idea de átomo.

John Dalton (1766-1844), un maestro de escuela inglés, publicó en la primera década de 1800 una serie de conceptos que constituyeron la primera teoría atómica científica basada en resultados experimentales. La propuesta de Dalton se puede resumir de la siguiente manera:

1. Todos los cuerpos, o materia, están formados de partículas extremadamente pequeñas llamadas átomos.
2. Los cuerpos que se encuentran en la naturaleza están formados por átomos que pueden ser de diferente tipo, pero el número de tipos diferentes es finito. Los átomos de un mismo elemento son iguales entre sí, tienen la misma masa e iguales propiedades.
3. Los átomos de un elemento químico no se transforman en otros de elementos diferentes mediante reacciones químicas; los átomos no se crean ni se destruyen en estos procesos químicos.

4. Los compuestos químicos contienen varios tipos de átomos y las proporciones en las que participan los diferentes tipos de átomos son siempre las mismas.

De acuerdo con la teoría atómica de Dalton, los átomos son los bloques más pequeños que forman la materia; son las partículas más pequeñas de un elemento químico que conservan su identidad.

Dalton llegó a concluir la existencia de los átomos basándose en observaciones indirectas y explicó varias leyes sencillas relacionadas con la combinación química. Una de ellas fue la ley de la composición constante que enunció de la siguiente manera: "la masa total de los materiales presentes después de una reacción química es la misma que la masa total antes de la reacción". Además, Dalton confirmó que los átomos conservaban sus identidades durante las reacciones químicas y que lo que dichas reacciones hacían era un reacomodo de los átomos para dar nuevas combinaciones químicas.

Características básicas del modelo atómico: núcleo con protones y neutrones, y electrones en órbitas. Carga eléctrica del electrón

El descubrimiento de la estructura atómica

En la época de Dalton los científicos se imaginaban a los átomos como una esfera diminuta indivisible, indestructible e inmutable. No fue sino hasta 1850, cuando los científicos comenzaron a acumular datos que sugerían que el átomo se componía de piezas todavía más pequeñas llamadas partículas subatómicas.

Los experimentos más importantes en los que se funda ese modelo están basados en el descubrimiento de que el átomo contiene partículas, que además de tener masa, tienen otra propiedad igualmente importante llamada carga eléctrica. Como se menciona más adelante, en esa época ya se conocía la existencia de dos tipos de cargas eléctricas llamadas positivas y negativas y se había llegado a la conclusión de que dos cargas del mismo signo se repelen y que cargas con signo diferente se atraen (*ley de Coulomb*).

La identificación del electrón

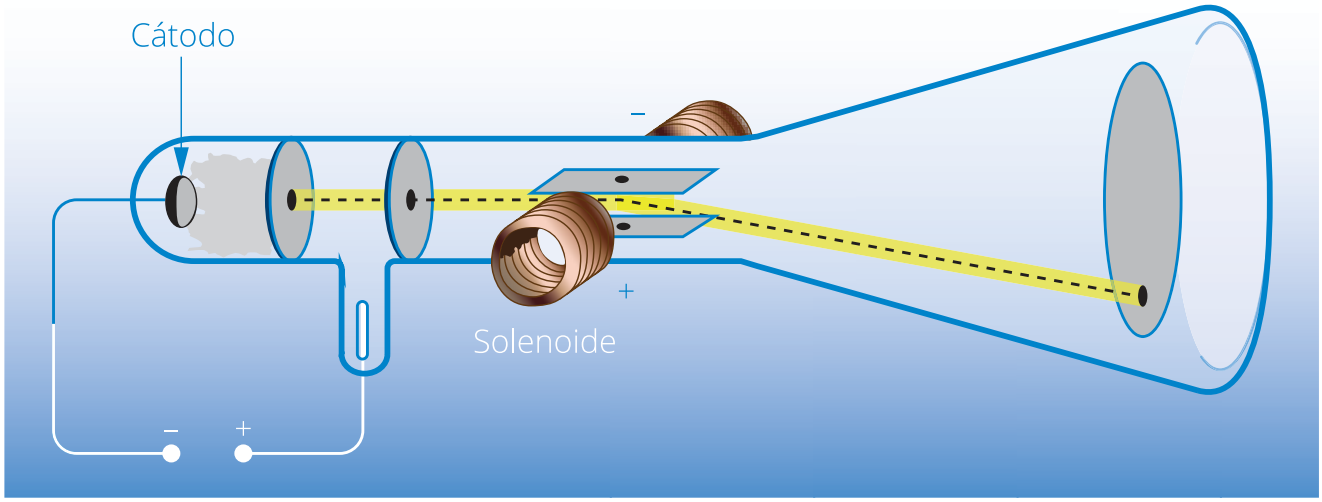
A mediados del siglo XIX los científicos comenzaron a estudiar los fenómenos que se producen al aplicar un alto voltaje entre dos láminas metálicas aisladas en un tubo de cristal. Observaron que al extraer el aire que encapsulaba la ampolleta de vidrio se producía una descarga eléctrica que se mantenía mientras se mantuviera el voltaje. A esa radiación producida entre las placas metálicas se le llamó *rayos catódicos* y fueron descubiertos en 1858 por el físico alemán Julius Plücker (1801-1868). Los rayos en sí son invisibles pero su movimiento se puede detectar debido a que al interaccionar con algunos materiales se despiden rayos de luz fluorescente (véase la figura 4-1).

Figura 4-1.
Luz fluorescente.

En la ausencia de campos magnéticos o eléctricos, los rayos catódicos viajan en línea recta, sin embargo, al aplicar estos campos, los rayos se desvían. Ya entonces se sabía que la dirección de la desviación dependía del signo de las cargas eléctricas y en este caso, su comportamiento indicaba que los rayos catódicos debían de estar constituidos por cargas negativas. Más aún, una placa metálica expuesta a rayos catódicos adquiría una carga negativa. Estas propiedades sugirieron a los científicos que la radiación consistía en una corriente de partículas con carga negativa, que ahora se les llama electrones. También se pudo comprobar que la deflexión de la radiación no dependía del material del cátodo. Todas estas observaciones dieron pie a la conclusión de que los electrones son un componente fundamental de la materia.

En ese momento, aunque se sabía que la radiación consistía de partículas con carga negativa, no se sabía la magnitud de esa carga, ni la masa de esas peculiares partículas. Fue en 1897 cuando el físico inglés Joseph J. Thomson (1856-1940) calculó la relación entre la carga eléctrica *e* y la masa *m* de un electrón, empleando un tubo de rayos catódicos como el que se muestra en la figura 4-2. Midiendo los efectos de los campos magnéticos y eléctricos sobre el movimiento de los rayos catódicos, Thomson determinó que la relación de $^{e}/_{m}$ es de 1.76×10^{8} coulombs por gramo ($^{C}/_{g}$).

Figura 4-2.
Tubo de rayos catódicos colimados.



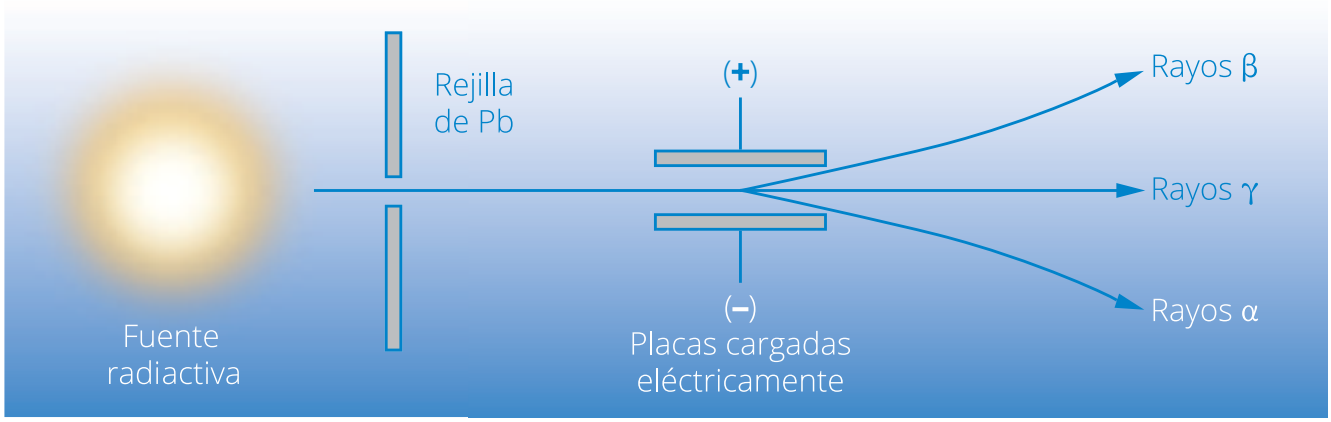
Una vez conocida la relación carga-masa del electrón, debía buscarse un experimento que midiera ya sea la carga o la masa, y de ahí poder calcular la otra cantidad. El mérito se lo llevó Robert Millikan (1868-1953), quien en 1909 logró medir la carga del electrón a través de un experimento conocido como el de *la gota de aceite*. Él encontró que la carga del electrón es de 1.6×10^{-19} C. Por lo que la masa del electrón debía ser 9.1×10^{-28} g. Esta masa es aproximadamente dos mil veces más pequeña que la del átomo de hidrógeno, el átomo más pequeño de la naturaleza.

Radiactividad

Así, a finales del siglo XIX se sabía que los átomos debían tener partículas negativas, pero también debían de tener algunas con carga positiva, ya que la gran mayoría de los objetos son neutros. El descubrimiento de las partículas con carga positiva se debió al científico francés Henri Becquerel (1852-1908), que en 1896, al estudiar un mineral que contenía uranio, descubrió que éste emitía espontáneamente una radiación con alta energía. A esta emisión espontánea de radiación se le denominó *radiactividad natural*. Fue Marie S. Curie (1867-1934), quien realizó los estudios más detallados de ese fenómeno. Ella realizó su tesis doctoral bajo la dirección de Becquerel sobre la radiactividad de las sales de uranio. Como resultado de esos estudios, Marie Curie descubrió dos nuevos elementos químicos, el polonio (Pb) y el radio (Ra). A estos estudios contribuyó también su esposo, Pierre Curie (1859-1906). Por esos hallazgos, los tres recibieron el Premio Nobel de física en 1903.

Estudios posteriores, realizados principalmente por el científico británico Ernest Rutherford (1871-1937), revelaron que la radiación emitida por el uranio contenía tres tipos de radiación, a los cuales llamaron alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Como se muestra en la figura 4-3, cada tipo difería en su respuesta a la aplicación de un campo eléctrico. Las radiaciones alfa y beta eran desviadas en direcciones opuestas y la gama no sufría ninguna desviación.

Figura 4-3. Experimento de Rutherford.



Rutherford demostró que tanto los rayos alfa como los beta consistían en partículas que se movían a alta velocidad. Él encontró que las partículas beta eran electrones con un comportamiento igual a los rayos catódicos. Por otro lado, las partículas alfa tenían una masa mucho mayor y una carga positiva. Pudo determinar que en unidades de carga de un electrón, las partículas beta tenían una carga de –1, y las alfa una carga de +2. De sus estudios también concluyó que las partículas alfa tenían una masa muy similar a la de los átomos de helio. Finalmente, él también llegó a la conclusión de que la radiación gamma es una radiación de alta energía que no consistía de partículas ni llevaba carga.

Núcleo Atómico

Al aumentar los indicios de que el átomo se compone de partículas más pequeñas, la atención se centró en determinar su estructura. A principios del siglo XX, J. J. Thomson tenía la certeza de que los electrones constituyen una fracción muy pequeña de la masa de un átomo, y que también ocuparían una fracción igualmente pequeña del volumen del átomo. Así, propuso que el átomo consistía en una esfera positiva de materia uniforme en la que estaban incrustados los electrones, como se muestra en la figura 4-4. Este modelo se hizo popular como el modelo del pudín con incrustaciones de pasas.

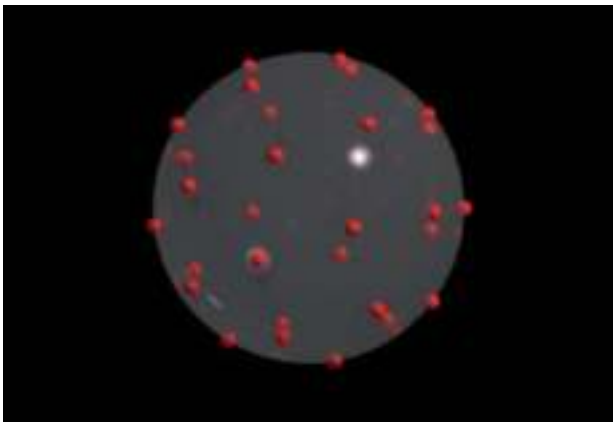


Figura 4-4. Modelo atómico de Thomson.

Sin embargo, en 1910 Rutherford y sus colaboradores realizaron un experimento que desacreditó el modelo de Thomson. En ese momento, Rutherford estudiaba los ángulos con los que partículas alfa se dispersaban al hacerlas incidir sobre una laminilla muy delgada de oro. Observó que la mayoría de las partículas alfa se dispersaban muy levemente, lo cual era congruente con el modelo de Thomson. Pero observaciones más cuidadosas, realizadas por Hans Geiger, hicieron notar que en algunos casos las partículas alfa se dispersaban con ángulos grandes, incluso algunas eran rebotadas por la lámina de oro, como se muestra en la figura 4-5. Rutherford describió este fenómeno de la siguiente manera: "Fue la cosa más increíble que me ha ocurrido en toda la vida. Era casi como si disparáramos un obús de quince pulgadas contra una hoja de papel, rebotara y nos golpeara".

Para 1911 Rutherford explicó sus observaciones de esta manera: postuló que la mayor parte de la masa del átomo y toda su carga positiva residían en una región muy pequeña, extremadamente densa, a la que llamó núcleo. La mayor parte del volumen total del átomo era espacio vacío en el que los electrones se movían alrededor del núcleo. En el experimento de dispersión de partículas alfa, la mayor parte de las partículas atraviesan directamente la laminilla porque no se topan con el diminuto núcleo; simplemente pasan por el espacio vacío del átomo. Ocasionalmente, una partícula alfa se acerca mucho a un núcleo de oro, la repul-

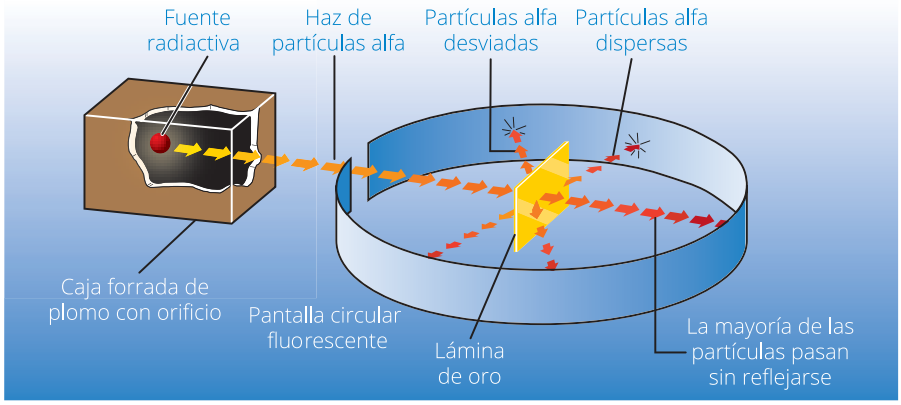


Figura 4-5.
Retrodispersión.

sión entre éste altamente cargado y la partícula alfa es lo suficientemente fuerte para desviarla, como se muestra en la figura 4-5.

El modelo atómico de Rutherford, a semejanza con el sistema solar, consistía en un núcleo positivo, rodeado por electrones girando alrededor del núcleo. La fuerza que los mantiene unidos es la fuerza eléctrica. Este modelo tenía aún problemas básicos de física que fueron resueltos por el físico danés Niels Bohr (1885-1962). Para explicar la estabilidad de los átomos, Bohr tuvo que postular algunos principios que salen del nivel de esta obra. Aquí sólo se mencionan y se da por válido ese modelo atómico (véase la figura 4-6).

Estudios posteriores condujeron al descubrimiento de que el átomo contiene tanto partículas positivas, llamadas protones, como neutras, llamadas neutrones. Rutherford descubrió los protones en 1919 y el científico británico James Chadwick (1891-1972) descubrió los neutrones en 1932.

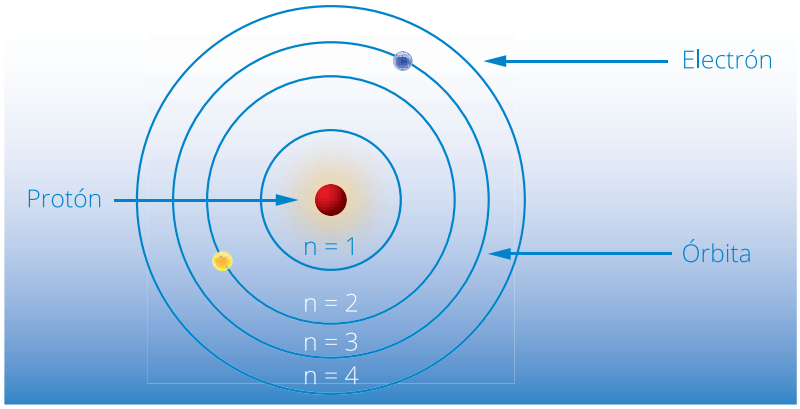


Figura 4-6.
Modelo atómico de Bohr.

Efectos de atracción y repulsión electrostáticas

Aquello que se llama comúnmente "electricidad" está presente en casi todo lo que nos rodea, de hecho, como se verá más adelante, sin ella no podría existir

la materia. Para responder éstas y muchas otras preguntas, se debe entender cómo se comporta la electricidad bajo ciertas condiciones y para ello es necesario comenzar desde abajo. Empecemos por preguntarnos qué ocurre si dos objetos se atraen. Quizá, debido a la experiencia cotidiana, se puede pensar que "están electrizados" o "son imanes", pero en el año 600 a. C., esta pregunta fue mucho más trascendente de lo que puede ser ahora, ya que dio lugar a una infinidad de desarrollos científicos, incluso a los aparatos electrónicos más sofisticados con los que se cuenta el día de hoy. En esa época, Tales de Mileto, uno de los más grandes pensadores de la antigua Grecia, observó la atracción que ejercía el ámbar (una resina amarilla y dura) sobre cuerpos ligeros después de frotarlo con pieles. Tales pensó que el ámbar adquiría un "alma" que le confería la propiedad de atraer objetos, descubriendo así la electricidad (lo que proviene de la palabra griega *electrón* que, precisamente, significa ámbar).

Tales de Mileto descubrió algo que ahora llamamos electricidad y para reproducir sus experimentos, se puede sustituir el ámbar por globos y las pieles por nuestro cabello. Si se frota el globo con el cabello, al acercarlo a pedacitos de papel, se observa que éstos son atraídos por él, si ahora se amarran dos globos en los extremos de un hilo, se frotan y se sostiene el hilo por la mitad dejando que los globos cuelguen, se observa que se repelen, ¿por qué?

Figura 4-7. Globos cargados eléctricamente.

Las observaciones de Tales no se formalizaron científicamente sino hasta muchos siglos después. Stephen Gray (1666-1736) descubrió, frotando diferentes materiales, que existían dos clases de electricidad: la *vítrea* (que se producía al frotar vidrio) y la *resinosa* (que se producía al frotar resinas, como el ámbar), y que cuerpos cargados con el mismo tipo de electricidad se repelen y los cargados con diferente tipo se atraen. Eso significa que hay una fuerza entre ellos que los jala o los empuja aunque no están en contacto.

Realice el siguiente experimento: suspenda con un hilo un popote por su punto medio permitiéndole girar libremente y frótelo con su cabello para cargarlo. Ahora frote un tubo de ensayo y acérquelo a uno de los extremos del popote. ¿Qué pasa? Ahora se frota el tubo de plástico (u otro popote) y se acerca al popote, ¿qué se observa? ¿Qué conclusiones se pueden sacar del experimento?

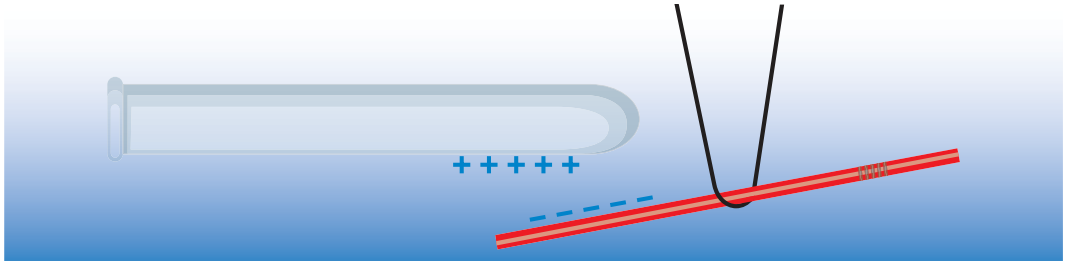


Figura 4-8. Cargas positivas y negativas. Experimento de Gray.

Con la varilla de vidrio ocurre el fenómeno contrario que con el tubo de plástico. Se concluye entonces que existen dos comportamientos opuestos en el experimento que claramente dependen del material que se cargó. Se puede pensar que el tubo de plástico se cargó igual que el popote suspendido, por ser del mismo material, y se repelió. Con el vidrio ocurrió lo contrario, es decir, lo atrajo. Entonces, los cuerpos cargados con el mismo tipo de electricidad se repelen y los cargados con diferente tipo se atraen, como lo concluyó Stephen Gray.

Ahora, ¿cómo se relaciona con la electricidad el hecho de frotar dos objetos? Se puede explicar imaginándose a la materia formada por átomos y a éstos por partículas *eléctricas* que siempre existen por pares, es decir, una *negativa* unida a una *positiva*. Las cargas que pueden arrancarse son sólo las negativas, y esto es más fácil en unos materiales que en otros. Al arrancar cargas negativas a un objeto neutro, éste queda cargado positivamente, como en el caso del vidrio en el experimento anterior, a diferencia del plástico, que al frotarlo queda con exceso de cargas negativas.

¿Se puede saber si un objeto está cargado eléctricamente con sólo mirarlo? Parecería que no, pero a continuación se verá cómo construir un sencillo aparato que detecta la carga. Recorte un rectángulo de cartón de unos 5 por 15 cm y fórrelo con papel aluminio, dóblelo en forma de "L" y péguelo con cinta adhesiva a un vaso desechable. Ahora se corta otro rectángulo sólo de papel aluminio de unos 3 por 4 cm, se le hace un pequeño doblez en la parte superior y se coloca como se muestra en la figura. Ahora, se frota un globo con el cabello y se acerca a la base de la "L", se puede observar que la lámina de papel aluminio se separa formando un ángulo. ¿Cómo se explica esto? En un principio existe el mismo número de cargas positivas y negativas distribuidas de forma uniforme en el aluminio, pero al acercar el globo éste atrae las cargas de signo contrario a la base y repele a las del mismo signo hacia el extremo de la "L" y por lo tanto hacia el rectángulo de aluminio, por lo que ambos tendrán el mismo tipo de carga y se repelerán, como se puede observar en el experimento.

Figura 4-9. Construyendo un electroscopio.

Bien, hasta ahora sólo se ha cargado a los cuerpos frotándolos, ¿habrá otra forma de hacerlo? Si se acerca el globo cargado al aparato que se construyó (*electroscopio*) sin tocarlo, cuando la hoja de aluminio esté levantada se toca momentáneamente con el dedo y se retira el globo. ¿Qué ocurre? ¿Cómo es que la hoja de aluminio permanece separada aún al retirar el globo? Con lo que se explicó hasta ahora, se puede entender de la siguiente manera: en un principio había el mismo número de cargas negativas y positivas, entonces, al acercar el globo cargado al electroscopio se atraen las cargas, digamos, positivas y se alejan las negativas, y al tocar la hoja de aluminio, estas cargas pasan a nuestro cuerpo quedando así un exceso de cargas

positivas en la "L" y, ya que están en contacto, también con la hoja de aluminio, ambas tienen el mismo signo y por lo tanto se repelen formando un ángulo. A este fenómeno se le llama "cargar por inducción".

El aparato que se construyó es un electroscopio muy rudimentario, en la figura 4-10 se muestra un electroscopio como el que se utiliza en los laboratorios y sirve para detectar la presencia de cargas eléctricas.

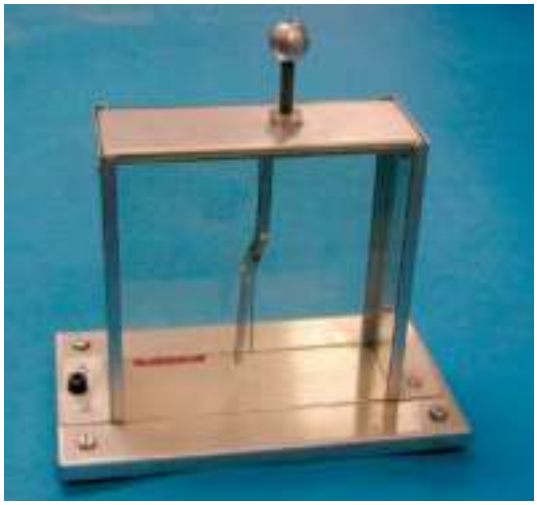


Figura 4-10. Electroscopio.

Ya que es posible cargar objetos frotándolos con otro material, se desarrollaron máquinas que producen electricidad llamados generadores Van der Graaff que por medio de un motor eléctrico hacen girar una banda de hule en contacto con cerdas, transportando la carga a una bola hueca de metal. Se pueden ver demostraciones de estos aparatos en algunos museos científicos. ¿Puede explicar por qué se le eriza el cabello al doctor Tomás Brody, brillante científico mexicano, fallecido en 1988? Al igual que ocurre con el electroscopio, la bola de metal se carga eléctricamente y al estar su mano en contacto con ella, todo su cuerpo se carga, incluyendo su cabello, el cual tiene la misma carga y, por lo tanto, las puntas se repelen unas a otras y se erizan.

Figura 4-11. Generador Van der Graaff.

Ley de Coulomb

Entonces, ya sabemos que los cuerpos se cargan positiva o negativamente. Pero para los físicos no es suficiente con saber que existe una fuerza eléctrica debida a las cargas, sino que se debe conocer cuantitativamente cuál es su magnitud. Para esto se realizó un experimento simple que consistió en considerar dos cargas y la distancia entre ellas.

El primero en estudiar cuantitativamente las fuerzas eléctricas fue el físico francés Charles Coulomb (1736-1806) en el año 1785. Él realizó su experimento construyendo una balanza de torsión (figura 4-12), aparato cuyo principio es similar al que se usó en el experimento de los popotes para recuperar las observaciones de S. Gray. De la figura, cuando la esfera cargada 1 se sitúa a una distancia

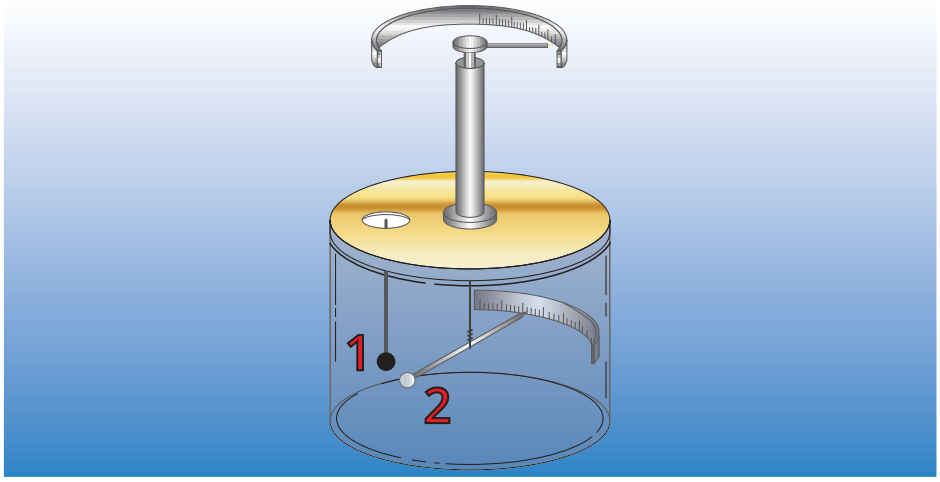


Figura 4-12.
Balanza de torsión de Coulomb.

determinada de la esfera cargada 2, la fuerza eléctrica sobre la esfera 2 hace girar el brazo horizontal del aparato, el cual queda en reposo en una nueva posición, con el hilo retorcido. A mayor torsión corresponde una mayor fuerza. De esta forma podía medir la fuerza eléctrica en función del ángulo de torsión. Variando la separación entre las esferas cargadas, determinó la fuerza como función de la separación.

Utilizando esferas cargadas, positivas y negativas, demostró que la fuerza es siempre inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre ellas. Esto lo llevó a enunciar la *ley de Coulomb* que dice:

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

Lo que matemáticamente se puede escribir así:

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

Cuando se multiplican dos números que tienen el mismo signo, el resultado es positivo y si su signo es diferente se obtiene un número negativo. En el caso de la ley de Coulomb, si las cargas son del mismo signo, se obtiene una fuerza positiva (se repelen) y si tienen signo diferente el resultado es una fuerza negativa (se atraen). Entonces la fuerza eléctrica tiene magnitud y dirección.

En el Sistema Internacional, las cargas se miden en coulombs (C), la distancia en metros (m) y la fuerza en newtons (N), por lo tanto, las unidades de la constante *k* se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{newtons} = [k]\frac{\text{couloms}^2}{\text{metros}^2}$$

despejando, las unidades de *k* son:

$$[k]=\frac{\text{newtons metros}^2}{\text{coulombs}^2}$$

y su valor es de:

$$k=9\times10^9\,\frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2}$$

Anteriormente se estudió otra ley que varía como el inverso de la distancia al cuadrado y ésta es la *ley de la gravitación universal*, y es la que hace que los planetas giren alrededor del Sol y depende de las masas de los cuerpos involucrados, matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

Como se puede observar, las dos son leyes con expresiones matemáticas similares y son ejemplos de fuerzas de acción a distancia, es decir, que los cuerpos o cargas de los que hablamos no están en contacto.

Campo eléctrico

Así como se habla del campo gravitacional, se puede hablar del campo eléctrico que se aplica a los objetos cargados eléctricamente. Como se sabe, alrededor de la Tierra existe un campo gravitacional que es el que nos mantiene unidos a ella. De la misma forma, existe alrededor de un cuerpo cargado un campo eléctrico. Una persona puede percibir el campo eléctrico de un generador Van der Graaff o de la pantalla de un televisor, si acerca la mano a ellos.

Entonces si se coloca una carga q_1 en el campo eléctrico *E*, experimenta una fuerza dada por:

$$F=q_1E$$

despejando

$$E=\frac{F}{q_1}$$

Si se sustituye el valor de *F* se obtiene:

$$E=\frac{kq_1q_2}{r^2}\frac{1}{q_1}=k\frac{q_2}{r^2}$$

En otras palabras, la fuerza eléctrica que una carga ejerce sobre la otra se puede describir como la interacción entre la carga y el campo eléctrico producido por la otra.

El campo eléctrico también tiene magnitud y dirección. En el Sistema Internacional, las unidades de E son:

$$[E]=\frac{\text{newtons}}{\text{coulombs}}$$

Potencial eléctrico

Cuando se estira una liga, en términos físicos, se almacena en ella *energía potencial*, es decir, el trabajo que costó estirarla (al vencer la fuerza de restitución que es la que hace que la liga recupere su forma) queda "guardado" en forma de energía dentro de las partículas de la liga, y está listo para que, en cuanto se suelta, se transforme ahora en lo que se llama *energía cinética*, que es la energía que posee un cuerpo al moverse. Lo mismo ocurre cuando en una montaña rusa suben el carrito a lo alto de una pendiente, están acumulando energía, pero ahora, la fuerza que se está venciendo no es la de restitución, como en el caso de la liga, sino la fuerza de gravedad de la Tierra.

Así que, existiendo una fuerza entre dos cargas con diferente signo, se puede imaginar que, si se tratan de alejar, se presentará una resistencia al hacerlo. Al igual que cuando se estira la liga, se acumula energía potencial, hacer esto es lo que se llama *realizar trabajo*.

Se puede entender el funcionamiento de una pila eléctrica pensando que está formada por muchas cargas que fueron empujadas unas contra otras acumulando energía como ocurre en el resorte (figura 4-13). En la figura 4-14 se muestra la siguiente analogía: al subir a lo alto de una pendiente, se acumula energía, la cual se libera al descender, además se sabe que una pila eléctrica acumula energía. Si la montaña rusa está montada desde una pila como se puede ver en la figura 4-14a, el carrito descenderá y liberará su energía. ¿Qué pasa si se ponen dos pilas una sobre la otra como en la figura 4-14b?

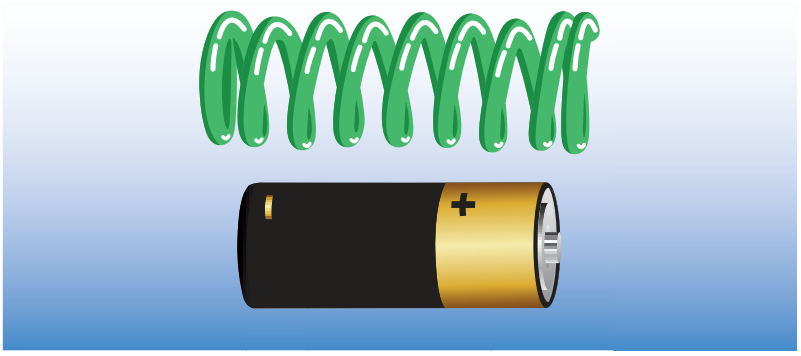


Figura 4-13. Representación de energía potencial de una pila como un resorte comprimido.

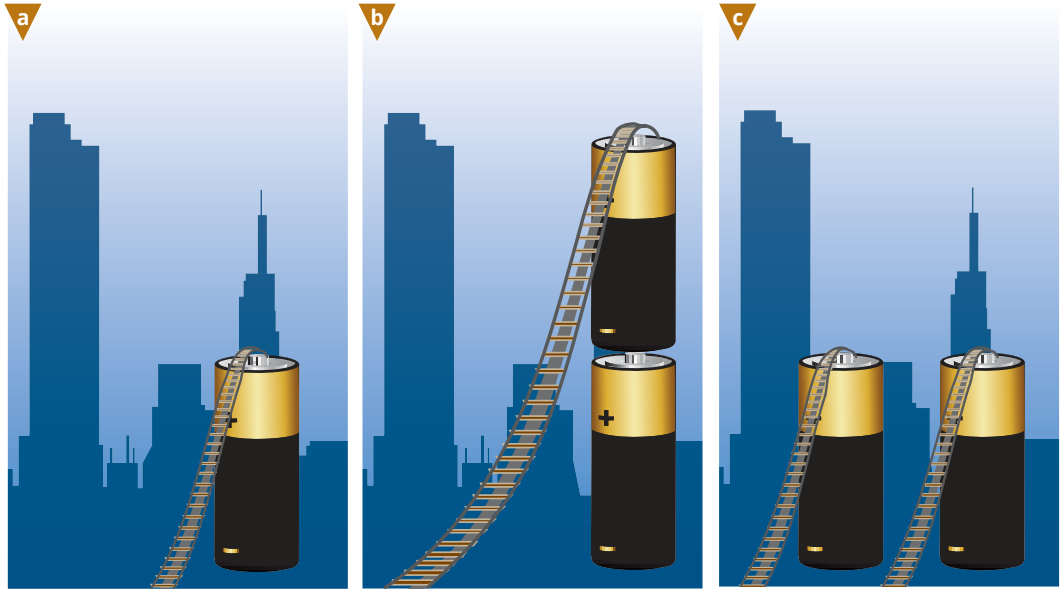


Figura 4-14. *a)* Montaña rusa con una pila. *b)* Montaña rusa con dos pilas en serie. *c)* Montaña rusa con dos pilas en paralelo.

¿Cuál será la diferencia de energía liberada al descender?

Ahora piense en dos pilas, pero ahora una junto a la otra (figura 4-14c), de las cuales desciende una montaña rusa de cada una, ¿cuál es la diferencia de energía liberada?

Si se tiene una pila sobre la otra, la energía liberada será el doble que la que existía cuando se tenía una sola. Al tener dos pilas, una junto a otra, dado que se tienen dos pendientes iguales con un carrito cada una, pudiendo transportar al doble de personas, si se piensa en ellas como partículas eléctricas, se habrán transportado el doble de éstas, a diferencia del caso en el que se tenía una pila sobre otra, en el que bajan más rápido, ya que la altura inicial es mayor.

Como es claro, el carrito se desplaza desde una altura mayor (lo que equivale a una energía potencial mayor), hasta una altura menor (una energía potencial menor). A la diferencia de energías potenciales por unidad de carga, se le llama diferencia de potencial eléctrico. Las pilas comerciales tienen un número, el más común es 1.5 V, éste es el valor de la diferencia de potencial acumulado en ellas. La *V* se refiere a Volts (en honor a Alessandro Volta, 1745-1827) y es la unidad de medida en el Sistema Internacional para diferencia de potencial eléctrico.

Corriente y resistencia eléctrica. Materiales aislantes y conductores

Con frecuencia se clasifica a los materiales en conductores y aislantes. Para entender esta clasificación, se propone la siguiente actividad:

Actividad

Cuelgue de un hilo una bolita de unicel forrada de papel aluminio, poniéndola en contacto con un extremo de una regla metálica y acercando un globo cargado al otro extremo de la regla. Se observa que la esfera es repelida por la regla. ¿Por qué? Cambie ahora la regla metálica por una de plástico y repita el experimento, se observa que ahora la bola no se mueve. Lo único que se cambió en la segunda parte del experimento fue la regla metálica por la de plástico. Entonces, se puede pensar que ambos materiales tienen diferente comportamiento. Esta diferencia consiste en que, en el metal, las partículas eléctricas son capaces de desplazarse a través de él, lo que no ocurre con el plástico. A los materiales que se comportan como el metal en este experimento se les llama conductores eléctricos y a los que se comportan como el plástico, se les llama aislantes eléctricos.

Circuitos

Hasta aquí se ha aprendido que existen partículas eléctricas que pueden moverse a través de materiales conductores y que éstas pueden adquirir energía potencial, como en el ejemplo de la montaña rusa. Ahora imaginemos la montaña rusa completa, es decir, con una cima principal (que le permite tener una diferencia de potencial), algunos rizos, etcétera, pero algo que casi todas tienen en común es que el recorrido es cerrado, esto es, forman un circuito. De manera intuitiva se puede imaginar muchas partículas cargadas moviéndose juntas formando un flujo, como el torrente de un río. Se define una cantidad que llamaremos *corriente eléctrica* como la cantidad de carga q que circula en un circuito por cada unidad de tiempo. Entonces,

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

por lo que la corriente tendrá unidades de coulomb sobre segundo, a lo que se le llama ampere. Ahora, esta corriente fluye por un material conductor y como se mencionó, para que exista esta corriente se requiere de una diferencia de potencial en el circuito. A principios del siglo XIX el científico George Ohm (1789-1854) descubrió que la corriente en los metales es proporcional a la diferencia de potencial eléctrico, entonces,

$$V \propto I$$

Adicionalmente descubrió que la constante de proporcionalidad es una propiedad del conductor a la que llamó *resistencia*, se puede interpretar como una oposición al flujo de corriente, enunciando así la ley que lleva su nombre,

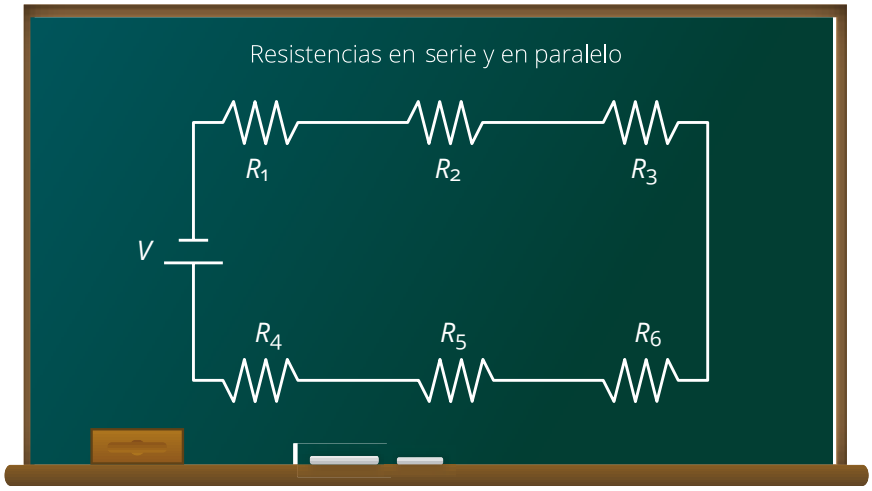


Figura 4-15.
Resistencias en serie.

$$V = RI$$

En el Sistema Internacional, las unidades para el voltaje V son los volts, las unidades de la corriente I son los amperes, entonces las unidades de la resistencia R serán volts/ampere, a esta unidad se le denomina ohm, en honor a su descubridor.

En nuestra vida cotidiana nos encontramos con una gran cantidad de aplicaciones en el diseño de aparatos eléctricos, combinando en un circuito diferentes elementos, como son pilas, resistencias, capacitores, transistores, etcétera, en diferentes arreglos. Por ahora sólo se hablará de pilas y resistencias conectadas en serie y en paralelo, como se puede ver en la figura.

Se llama resistores a dispositivos conductores con un valor característico de resistencia R en la *ley de Ohm* y se representa por una línea en zigzag, en la figura se representan tres resistores R_1, R_2 y R_3.

De la *ley de Ohm*, la resistencia equivalente en el circuito, que es una cantidad que representa la contribución de todas las resistencias involucradas, está dada por:

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

En un circuito con tres resistencias conectadas en serie, circula la misma corriente en cada una, entonces, el voltaje total será la suma de los voltajes de cada uno de los resistores en serie, esto es:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

así que:

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

Entonces, cuando las resistencias están conectadas en serie, la resistencia equivalente será igual a la suma de las resistencias.

Ahora, cuando se tienen tres resistencias conectadas en paralelo, la corriente total que circula por el arreglo en paralelo es la suma de las corrientes que fluyen por cada resistencia, imaginemos la tubería de una casa, donde hay una toma principal de la cual se derivan varias tuberías más pequeñas para el lavabo, la regadera, el fregadero, etc. Entonces,

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Pero como la pila es la misma, el voltaje será igual. Entonces,

$$\frac{I}{V} = \frac{I_1}{V} + \frac{I_2}{V} + \frac{I_3}{V}$$

De modo que:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Entonces cuando las resistencias están conectadas en paralelo, el inverso de la resistencia equivalente es la suma del inverso de cada resistencia.

Se pueden simplificar entonces circuitos complicados dividiéndolos en combinaciones de circuitos sencillos conectados en serie y en paralelo.

Otro elemento que se puede estudiar es el capacitor, el cual no es más que un arreglo de dos placas conductoras paralelas separadas por un aislante (generalmente plástico), entonces, si cada placa se carga eléctricamente con carga opuesta, las partículas cargadas se atraerán unas con otras por lo que se quedarán almacenadas en las placas tratando de acercarse, hasta que exista algún medio por el cual se conecten eléctricamente ambas placas.

Un circuito muy conocido es el llamado *circuito RC*, donde se combina una resistencia *R* con un capacitor *C* como se observa en la figura 4-16.

Al cerrar el interruptor, se carga el capacitor, se puede imaginar como un tanque que se llena de agua; al abrir nuevamente el interruptor, la resistencia ac-

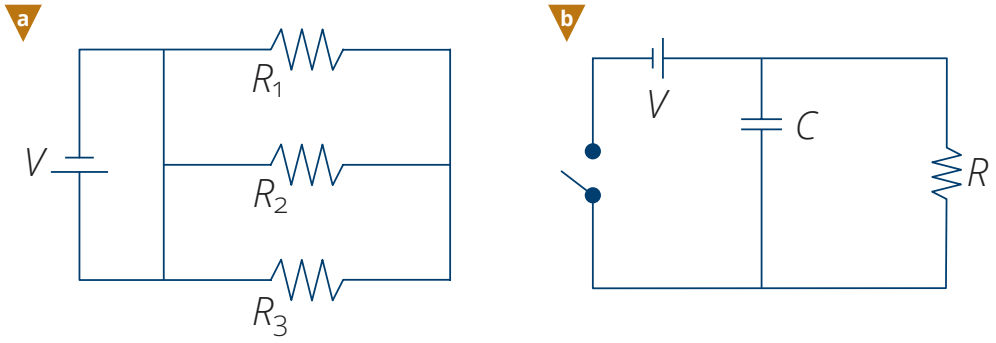


Figura 4-16.
a) Resistencias en paralelo. b) Circuito RC.

tuará como un tubo con un diámetro pequeño por el cual se vacía el tanque más lentamente de lo que se llenó. Este circuito es fundamental en el diseño de aparatos cuyo funcionamiento involucra la medida del tiempo.

Potencia eléctrica

Una cantidad importante es la *potencia eléctrica*. Siempre que una carga eléctrica se mueve a través de un circuito se realiza un trabajo, el cual se utiliza para hacer funcionar alguno de sus elementos, como prender un foco o hacer girar un motor. Así que, considerando que la potencia es la rapidez con la que se realiza un trabajo, también puede decirse que es la energía que transforma una máquina o cualquier dispositivo eléctrico por cada segundo. Si se recuerda la analogía de la montaña rusa con la energía potencial. Cuando el carrito sube a la cima a una altura *h* sobre el nivel del suelo, tendrá una energía potencial y podrá bajar por el riel realizando un trabajo equivalente. Es decir:

$$T = E_p$$

Entonces, si se considera que el voltaje, o la diferencia de potencial, se puede expresar como la energía potencial por unidad de carga, es decir,

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

entonces, $V = T/q$ y por lo tanto $T = Vq$. Ahora, la potencia es la rapidez con la cual se realiza un trabajo, es decir:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{Vq}{t}$$

y, recordando que la corriente $I = q/t$, llegamos a que la potencia eléctrica, en watts, es el producto de la corriente en amperes por el voltaje en volts, esto es,

$$P = VI.$$

Nociones de electromagnetismo

Campo magnético

Hace aproximadamente 2000 años, en la ciudad griega de Magnesia se encontraron unas piedras de magnetita que atraían pedazos pequeños de hierro. A este fenómeno se le conoce como magnetismo.

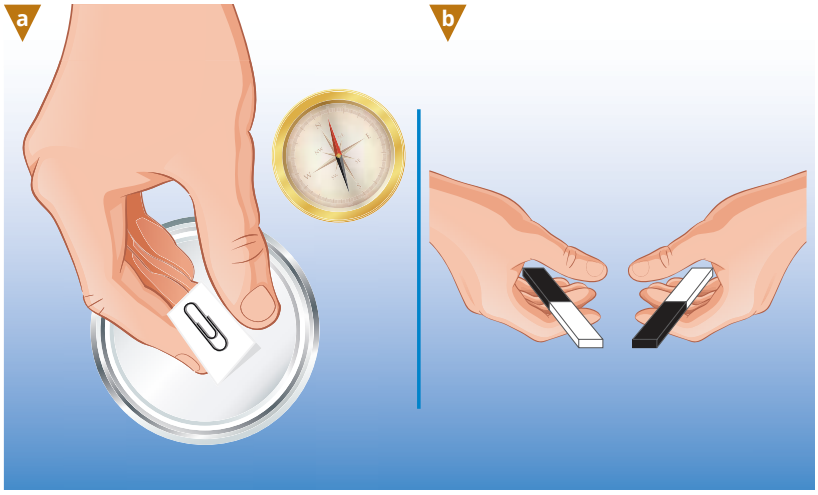


Figura 4-17. Experimento de magnetismo.

Al acercar dos imanes de barra, como en la figura 4-17b, se observa que se atraen, pero si se voltea uno de ellos, se repelen.

Actividad

Al frotar un clip con un imán, el clip adquiere propiedades magnéticas, y si se pone sobre un pedazo de unicel a modo de flotador, y el conjunto en un recipiente con agua, se observa que se orienta espontáneamente en una dirección (figura 4-17a). Al extremo que apunta hacia el norte le llamaremos "N" y al otro "S". Esto es lo mismo que ocurre en el experimento anterior, pero ahora tenemos un imán enorme que orienta al clip: la Tierra. En cualquier región en donde una aguja imantada se orienta, se dice que existe un campo magnético.

Figura 4-18. Brújula.

En el siglo XI se descubrió que una aguja imantada montada libremente se orientaba. Así, una brújula es un imán formado por una aguja ligera de acero imantada que se apoya sobre un soporte con muy poca fricción. La invención de la brújula como tal se atribuye a los chinos. Existe una leyenda según la cual, en una batalla en la niebla, el emperador Huang-ti en 2634 a. C., empleó, para orientar a las tropas, un carro con una figura humana que señalaba siempre el sur. En realidad la primera referencia escrita del uso de la brújula por los chinos data del siglo XI. Entre los árabes se menciona por primera vez en 1220. Probablemente fueron ellos quienes la introdujeron en Europa, donde no tardó en ser adoptada por los vikingos.

Los fenómenos electromagnéticos y su importancia

Descubrimiento de la inducción electromagnética: experimentos de Oersted y de Faraday

Materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos

No todos los metales serán atraídos por un imán. Si se hace la prueba de acercar varios metales a un imán, uno se dará cuenta de que el aluminio de una lata de refresco no es atraído por éste. Entonces, al igual que existen materiales conductores y aislantes, existen materiales *ferromagnéticos*, *paramagnéticos* y *diamagnéticos*, los primeros son aquellos que son atraídos por el imán, los segundos pueden ser atraídos en menor intensidad y los últimos no son atraídos. Sin embargo, muchas veces es difícil diferenciar a los materiales paramagnéticos de los diamagnéticos. Dado que los ferromagnéticos son los que presentan propiedades magnéticas, trataremos sólo con ellos.

Bobinas, campos magnéticos y corrientes eléctricas. Efecto de un campo magnético sobre una carga en movimiento

De forma similar a la fuerza que siente una partícula cargada en un campo eléctrico, la cual se calculaba como:

$$F = qE$$

es posible calcular la fuerza que siente ahora una partícula cargada en movimiento debida a un campo magnético, ésta estará dada por:

$$F = qvB\,\mathrm{sen}\,\theta$$

donde v es la velocidad de la partícula, q su carga, B la magnitud del campo magnético, y θ el ángulo que forman la velocidad con las líneas de campo.

Generalmente, en los aparatos que usan este principio el ángulo θ es de 90°, de modo que el sen θ es igual a 1, así que es posible emplear la expresión

$$F = qvB$$

Esta fuerza hará que la trayectoria de la partícula se desvíe. Este fenómeno es el responsable del funcionamiento del cinescopio de los primeros aparatos de televisión. De manera muy simplificada, se puede describir como un generador de partículas cargadas negativamente que salen de un punto con una cierta velocidad, las cuales pasan por un campo magnético variable (generado por un par de bobinas, las cuales se analizarán más adelante) que permite desviar a las partículas con mucha precisión, de modo que incidan en la pantalla para formar una imagen.

El electroimán y aplicaciones del electromagnetismo

Generación de un campo magnético por una corriente eléctrica

En el año de 1820, Hans Oersted realizó un experimento para demostrar a sus alumnos que las cargas en movimiento y los imanes no interactuaban. El experimento consistía en colocar una brújula cerca de un alambre y la hipótesis era que si existiera algún tipo de interacción, al hacer circular una corriente eléctrica por el alambre, la aguja de la brújula se movería. Para su sorpresa, la aguja se orientó perpendicularmente al alambre. Lo que sucedió fue que hasta ese momento Oersted siempre había realizado el experimento poniendo el alambre perpendicular a la aguja, por lo que no había observado ningún movimiento en ella dado que ya estaba orientada. Cuando lo realizó frente a sus alumnos, por casualidad puso el alambre y la aguja paralelos y entonces notó el efecto, el cual cambia dependiendo de la orientación entre la brújula y el alambre. Con este experimento se demuestra que una corriente eléctrica (la cual es un flujo continuo de cargas eléctricas) genera un campo magnético.

Actividad

Figura 4-19. Experimento de Oersted.

Un experimento parecido al de Oersted consiste en usar un alambre largo enrollado, o sea, una bobina. Para construirla, enrolle un pedazo de alambre de cobre en la parte más ancha de un vaso de unicel dándole 150 vueltas más o menos. Raspe con una lija el barniz aislante de las dos puntas de la bobina. Cuelgue un imán de barra por su parte central, de forma que quede en posición horizontal. Acerque el imán a la bobina y conéctela a una pila tamaño D.

¿Qué se espera que ocurra? Ahora desconecte la pila, ¿qué sucede? Identificando con etiquetas de colores los dos extremos o polos del imán, se puede repetir el experimento. Al conectar la pila, uno de los polos del imán quedará apuntando hacia afuera del vaso. Si se intercambian las conexiones de la pila, se observa que es el otro extremo el que apunta hacia afuera. La orientación del campo magnético que genera la bobina depende de la dirección de la corriente eléctrica, tal y como demostró Ampere.

¿Cómo funcionan los audífonos?
Una aplicación directa de este fenómeno es la fabricación de una bocina.

Actividad

Construya otra bobina más pequeña, enrollando el alambre a un marcador grueso, dándole unas 30 vueltas y pegándola al fondo a un vaso desechable de plástico. Conecte las puntas de la bobina a la entrada de audífonos de un radio. No pasará nada hasta que acerque un imán a la bobina, entonces sonará.

Figura 4-20. Bocina.

Al hacer pasar una corriente eléctrica por la bobina, se genera un campo magnético que ejerce una fuerza sobre el imán. El radio está construido para modular una corriente eléctrica con el sonido (en la figura 4-21 se muestra una representación gráfica). Esta corriente eléctrica al pasar por la bobina genera un campo magnético que al interactuar con el imán hace vibrar al vaso produciendo el sonido.

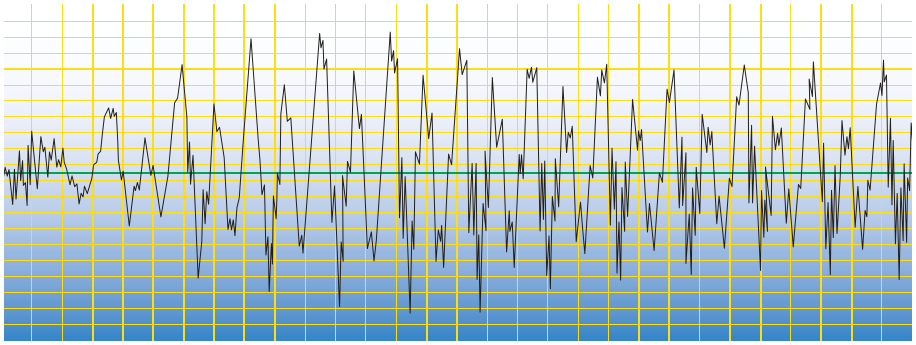


Figura 4-21. Modulación de sonido.

El principio de funcionamiento de un motor es el mismo que el de la bobina que orienta al imán. Es decir, se genera una fuerza magnética que hace que un embobinado montado en el eje, girando libremente, se oriente con el imán, y la corriente que alimenta al embobinado se conecta y desconecta selectivamente dependiendo de la orientación del eje.

Actividad

Construya un motor usando dos clips, alambre de cobre, un imán, una pila y un vaso desechable. Se enrolla el alambre de cobre en un plumón dándole unas 30 vueltas, enrollando las puntas para sujetarlas, dejando un pedazo de alambre, el cual se montará sobre los clips y éstos sobre el vaso, como se puede ver en la figura. Se raspa el barniz aislante completamente de una de las puntas, y a la otra se le raspa sólo la mitad, como se muestra. Ahora se coloca el imán debajo de la bobina y se conectan los extremos de la pila a los clips. El motor está listo. Es necesario dar un impulso inicial a la bobina para que arranque.

Figura 4-22.
a) Motor eléctrico.
b) Detalle de construcción.

Aunque este motor es muy sencillo, el principio de su funcionamiento es el mismo que el de los motores eléctricos más grandes que se usan en aparatos electrodomésticos, elevadores, bombas hidráulicas, etcétera.

Un electroimán no es otra cosa que una bobina con un núcleo de hierro dulce, con el cual se intensifica el campo magnético generado al hacer pasar una corriente por la bobina. Fue inventado en la primera mitad del siglo XIX por Ampere y sus colaboradores en Francia, y de forma independiente por el físico estadounidense Joseph Henry. Este invento dio lugar a diversos dispositivos como el motor eléctrico, el telégrafo, el teléfono, entre muchos otros.

Actividad

Enrolle alambre de cobre alrededor de un tornillo de unos 5 cm de longitud, dándole unas 100 vueltas, dejando libres los extremos del alambre como se muestra en la figura. Raspe el barniz aislante de ambos extremos del alambre con una lija o lima de uñas. Conecte estos extremos a una pila tamaño D. Observe que, mientras esté conectado el electroimán, éste puede atraer y sostener objetos ligeros de metal ferromagnético, como clips, clavos, tachuelas, monedas de niquel.

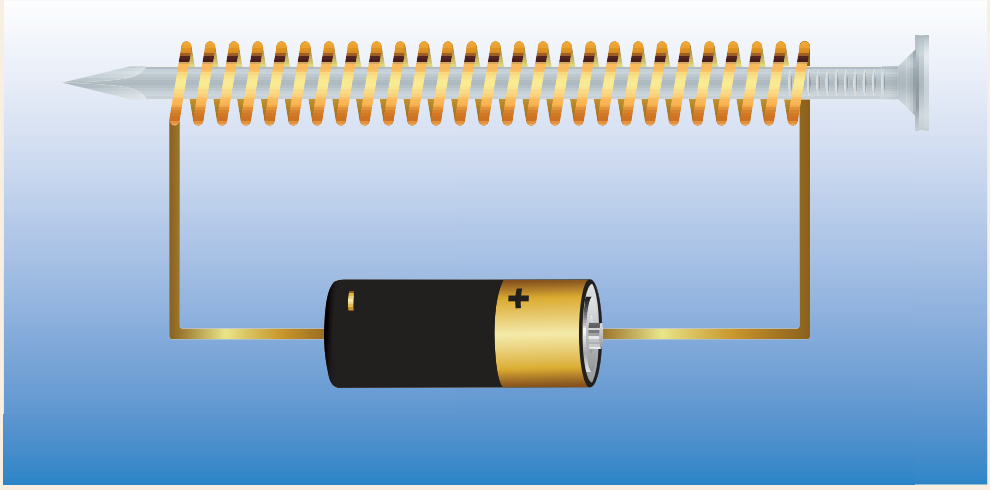


Figura 4-23. Electroimán.

¿Cómo se genera la corriente eléctrica que llega a las casas?

Al igual que una corriente eléctrica genera un campo magnético, un campo magnético puede generar una corriente eléctrica. Este fenómeno, se puede observar usando la bobina que se construyó para el experimento de Oersted. Ahora se conecta la bobina a un voltímetro. Se acerca lentamente el imán a la bobina y se mantiene fijo. La aguja del voltímetro no se moverá, indicando que no se genera ninguna corriente. Ahora acerque y retire rápidamente el imán, se observa un movimiento en la aguja indicando que se generó una corriente. De esto se concluye que es el cambio en el campo magnético lo que genera la corriente eléctrica.

¿Cómo se puede generar una corriente constante? Una primera idea es hacer girar rápidamente el imán cerca de la bobina. ¿Sería lo mismo mover la bobina cerca del imán? Un generador funciona de forma similar a un motor eléctrico, donde se tiene una bobina que puede girar cerca de un imán, generando una corriente.

Entonces, la electricidad que llega a las casas se genera de forma similar al experimento anterior, pero a una escala mucho mayor, es decir, algún mecanismo,

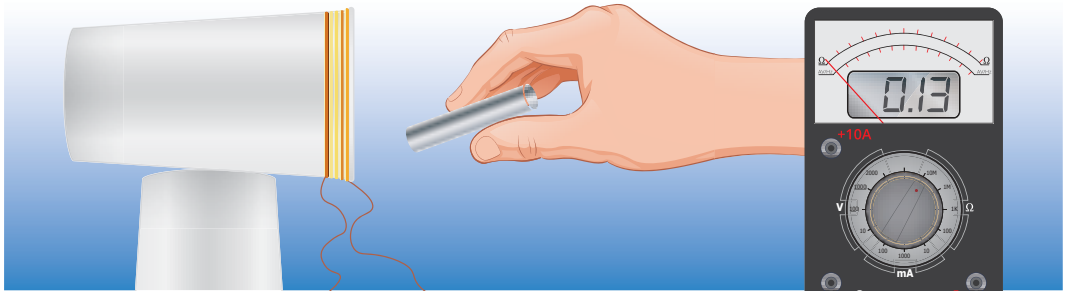


Figura 4-24. Generación de corriente debido al cambio de un campo magnético.

dependiendo de la tecnología de la planta, hace girar grandes generadores que funcionan con este principio.

Hasta ahora se ha aprendido que una corriente eléctrica circulando en una bobina genera un campo magnético y, además, que un campo magnético genera una corriente eléctrica en una bobina. Entonces, al conectar los extremos de la bobina entre sí, ¿la corriente generada en la bobina por un campo magnético produce otro campo magnético? La respuesta es sí, pero el campo producido se opone al campo magnético externo. Es decir, ambos campos se repelen. De hecho en el experimento donde se acerca y retira rápidamente el imán de la bobina existe una fuerza que se opone al movimiento que se realiza. Aunque en estas condiciones, esta fuerza es pequeña y casi imperceptible, es posible diseñar un experimento que permita apreciarla.

Actividad

Se usará un imán de barra y una bobina de pocas vueltas, de un diámetro sólo un poco mayor que el ancho del imán. Raspe el barniz aislante de las puntas y únalas. Ahora sujete la bobina a uno de los extremos de un popote y coloque algunos clips del otro extremo como contrapeso. Cuelgue el popote, por el centro, como se muestra en la figura.

Figura 4-25. Ley de Lenz.

Ahora pase el imán a través de la bobina sin tocarla. ¿Qué ocurre? ¿Hacia dónde gira el popote? ¿Qué pasa si no se unen las puntas de la bobina?

Como se podrá observar, el popote gira como si el imán "empujara" a la bobina, es decir, se genera una fuerza que se opone siempre al movimiento del imán, independientemente de su orientación.

El fenómeno observado en la actividad lo explicó el físico ruso Heinrich Friedrich Lenz (1804-1865) y se puede resumir de la siguiente manera:

> "La corriente inducida en la bobina es tal que el campo magnético producido por ella se opone al campo magnético del imán que la genera."

Esto no es otra cosa que una consecuencia más de la conservación de la energía.

¿Qué son y para qué sirven los transformadores que están afuera de las casas?

Como se vio anteriormente, al hacer pasar una corriente variable (alterna) por una bobina, se genera un campo magnético, ahora, si se acerca otra bobina, en ésta se inducirá entonces una corriente. Visto de otra forma, si se hace pasar una corriente variable por un circuito cerrado, inducirá un voltaje en otro circuito cerrado, este fenómeno que consiste en la producción de un voltaje en otro circuito, precisamente por medio de una corriente variable en algún otro lugar, fue descubierto por Faraday y Henry de forma independiente a mediados del siglo XIX.

Una de las aplicaciones más comunes de la *ley de Faraday* es precisamente en los transformadores, que constan de dos bobinas, una a la que se le llama *primaria* y otra *secundaria*. Por detalles técnicos se construyen de tal forma que la *secundaria* está enrollada sobre la *primaria*, de modo que por ambas pasa la misma cantidad de líneas de campo magnético. El cociente de los voltajes en una y otra bobina está relacionado de la siguiente manera:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

y considerando que la potencia en ambas bobinas debe ser la misma (por conservación de la energía):

$$V_p I_p = V_s I_s$$

de donde

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

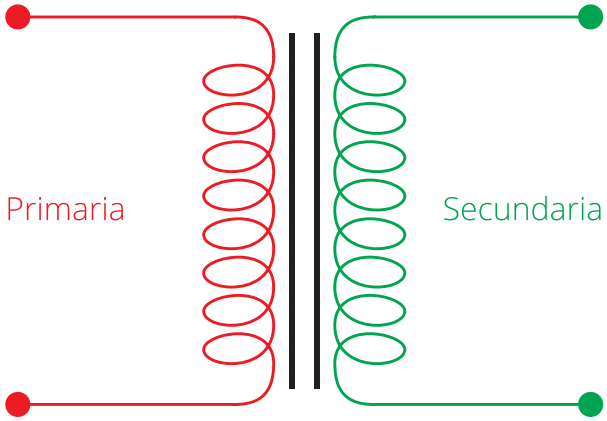


Figura 4-26. Transformador. Inducción de corriente con dos bobinas.

Por lo tanto,

$$\frac{V_s}{V_p}=\frac{I_p}{I_s}=\frac{N_s}{N_p},$$

donde V_s y V_p son los voltajes secundario y primario respectivamente, N_s y N_p son el número de vueltas de las bobinas secundaria y primaria, I_s e I_p son lo propio para las corrientes.

Se mencionó que para que una bobina genere una corriente, ésta debe estar en presencia de un campo magnético que cambie con el tiempo, esto se logra haciendo pasar por la primaria una *corriente alterna*, la cual, a diferencia de la corriente que se obtiene de una pila (*corriente directa*), pasa de ser positiva a negativa 60 veces por segundo. De esta última ecuación se obtiene que si se aplica un voltaje de corriente alterna a la bobina primaria, el voltaje inducido en la bobina secundaria puede ser mayor o menor, dependiendo del número de vueltas en cada bobina. Esto se puede aplicar también a las corrientes. Así que los transformadores de las calles, que alimentan de electricidad a las casas, se rigen por esta sencilla ecuación.

Se sabe que se pierde una gran cantidad de energía al transportar la electricidad desde la planta que la genera hasta las casas, por lo que es necesario generar una mayor cantidad de energía en las plantas, sin embargo, si se aumentara la corriente, los cables se calentarían demasiado. Por ello, para transmitir energía eléctrica a grandes distancias, la corriente debe ser pequeña y el voltaje alto, entonces, en la planta el voltaje es de 120 000 V aproximadamente. Al llegar a la ciudad se reduce el voltaje con un primer transformador a 2 200 V, y finalmente, con el transformador que está fuera de las casas se reduce a 120 V.

Lo que se observa en la ecuación es que los voltajes y las corrientes están en relación inversa. Y entonces al llegar al transformador, éste reduce el voltaje y aumenta la corriente.

Por lo anterior los científicos trabajan en encontrar materiales para hacer más eficiente el transporte de electricidad: los superconductores, que son materiales que prácticamente no presentan resistencia eléctrica, con lo cual se perdería

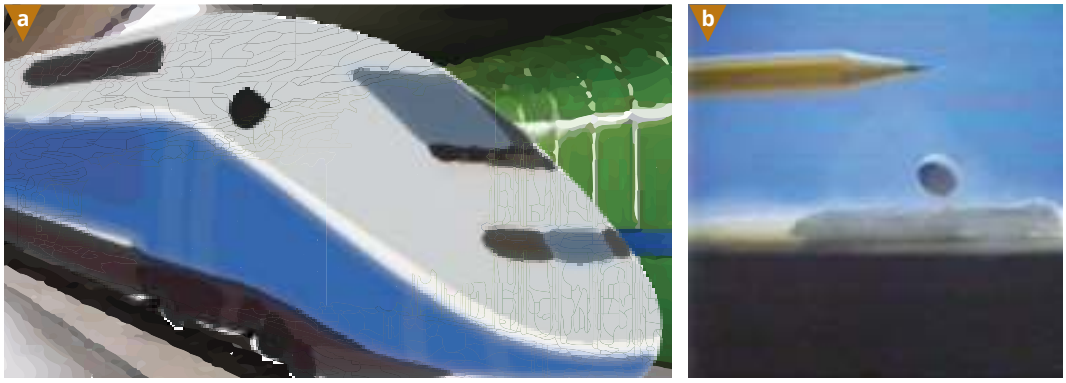


Figura 4-27.
a) Tren *Maglev*.
b) Levitación magnética.

muy poca energía en transportarla. Los materiales que se han encontrado para este propósito hasta la fecha sólo funcionan a temperaturas muy bajas (aproximadamente 200 °C bajo cero, que es la temperatura del nitrógeno en su estado líquido), por lo que se tendrían que enfriar los cables a esta temperatura, lo cual sería muy costoso. Otra propiedad de estos materiales es que expulsan el campo magnético de su interior, de modo que levitan en presencia de un imán. Un ejemplo de la aplicación de este fenómeno es el tren levitado japonés *Maglev*, el cual tiene bobinas de material superconductor en la parte inferior y conforme se desplaza, éstas inducen corriente en las bobinas fijas en el carril y actúan como imanes "espejo" que hacen levitar el tren a unos centímetros del riel, lo cual hace que no exista fricción entre el tren y el riel haciéndolo muy rápido y eficiente (figura 4-27a).

Composición y descomposición de la luz blanca

Desde tiempos remotos, los seres humanos se han maravillado ante las manifestaciones de la naturaleza. En particular, sigue siendo motivo de admiración la aparición del arco iris, de un rojo horizonte en el crepúsculo o del intenso azul del cielo de un día despejado; todos ellos, fenómenos relacionados con la luz. Las personas siempre se han preguntado ¿por qué ocurre esto?, ¿cómo es que se produce? Algunas de ellas se han dedicado al estudio de estos fenómenos aportando conocimientos para su explicación y para el diseño de algunos dispositivos ópticos de uso común.

Los primeros lentes para mejorar la capacidad visual de las personas se diseñaron en la Edad Media. Asimismo, la construcción de los primeros microscopios y telescopios data del inicio del siglo XVII. Es importante hacer notar que el desarrollo del microscopio permitió dar un gran salto en el estudio de los microorganismos y sentar las bases de la biología y la medicina modernas. Por otro lado, con el uso del telescopio se corroboró la teoría del sistema solar heliocéntrico propuesto por Copérnico; avance científico que revolucionó la concepción del universo.

Isaac Newton formuló la explicación del arco iris a fines del siglo XVII, y lord Rayleigh explicó el azul del cielo más de un siglo después.

En el siglo XX se aceptó que la luz tenía características tanto ondulatorias como corpusculares. A James Clerk Maxwell (1831-1879) se debe el desarrollo de la teoría que demostró que la luz es la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia e incluso predijo la velocidad a la que se propagan.

Fuentes de luz

La luz es indispensable para el desarrollo de las actividades humanas. Durante el día se dispone de la luz del Sol, en tanto que por las noches, o aún en el día en lugares cerrados, se usan fuentes artificiales.

La principal fuente natural de luz y energía es el Sol, pero también lo son una fogata, una antorcha encendida, un metal calentado al rojo vivo, una vela encendida, etcétera.

En cuanto a fuentes artificiales, en la actualidad son muchas y muy diversas. Basta recordar que se cuenta con focos incandescentes, LED y lámparas de diversos tipos.

La luz solar es determinante para el proceso de la fotosíntesis y no menos importante es el hecho de que la luz es indispensable para que personas y animales puedan ver lo que existe en su entorno, e incluso para su metabolismo. Para poder ver los objetos, es necesario que estén iluminados; esto es, que incida luz sobre ellos y que al ser reflejada, se perciba con los ojos. Desde luego, también se percibe la luz emitida por la fuente luminosa y no sólo la reflejada por los objetos.

Figura 4-28. Botella proyectando su sombra en la pared.

Luz, color y sombras

La luz se transmite en el vacío y a través de algunos materiales. Dentro de los materiales que la luz atraviesa, están los transparentes y los translúcidos. Entre los transparentes, se pueden enlistar el aire, el agua, el vidrio y algunas substancias como el alcohol, acetona y otras. Los materiales translúcidos permiten el paso de la luz en forma difusa, sin permitir ver con claridad lo que está del otro lado, ejemplos son las láminas acrílicas para techos o los vidrios esmerilados.

Los materiales a través de los cuales la luz no puede transmitirse se denominan opacos. Con estos están construidos la mayor parte de los objetos del entorno. Además, se usan objetos elaborados a partir de materiales opacos como protección de los rayos solares, evitando así la insolación y quemaduras provocadas por la exposición a la radiación solar.

La característica de los cuerpos opacos, de no permitir que la luz pase a través de ellos, da lugar a la formación de sombras. Esto se debe a que la luz que incide sobre ellos no puede atravesarlos y viaja en línea recta.

Características del espectro electromagnético y espectro visible: velocidad, frecuencia, longitud de onda y su relación con la energía

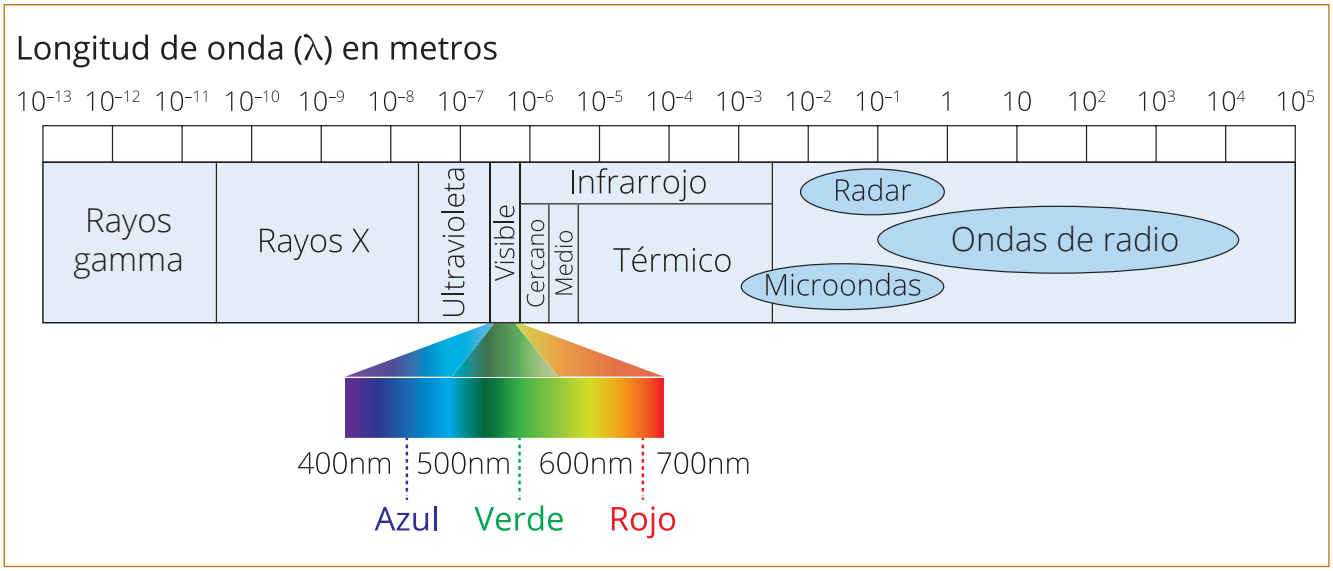
Las ondas electromagnéticas están formadas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes y son producidas por cargas eléctricas que oscilan a muy alta frecuencia, expandiéndose radialmente a una velocidad de 300 000 $^{km}/_{s}$, en el vacío.

En el caso de las fuentes luminosas, existe en ellas una infinidad de átomos excitados vibrando a altas y muy variadas frecuencias, con sus electrones saltando entre niveles atómicos y también con infinidad de electrones libres brincando de un átomo a otro; todo ello da lugar a la emisión de ondas electromagnéticas en una amplia gama de frecuencias; incluidas, desde luego, las frecuencias de la luz visible, del infrarrojo (ondas electromagnéticas asociadas al calor) y del ultravioleta.

El ser humano ha diseñado y elaborado dispositivos electrónicos para la generación, detección y control de ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta y rayos X, todos éstos, dentro de la familia de las ondas electromagnéticas.

Como se puede ver en la figura, la parte correspondiente al rango visible es relativamente angosta; las personas pueden detectar ondas electromagnéticas cuya frecuencia está entre 4.0×10^{14} Hz y 7.5×10^{14} Hz, correspondientes a longitudes de onda de entre 4.0×10^{-7} m y 7.5×10^{-7} m (esto es, entre 400 y 750 nanómetros).

Figura 4-29. Espectro electromagnético.



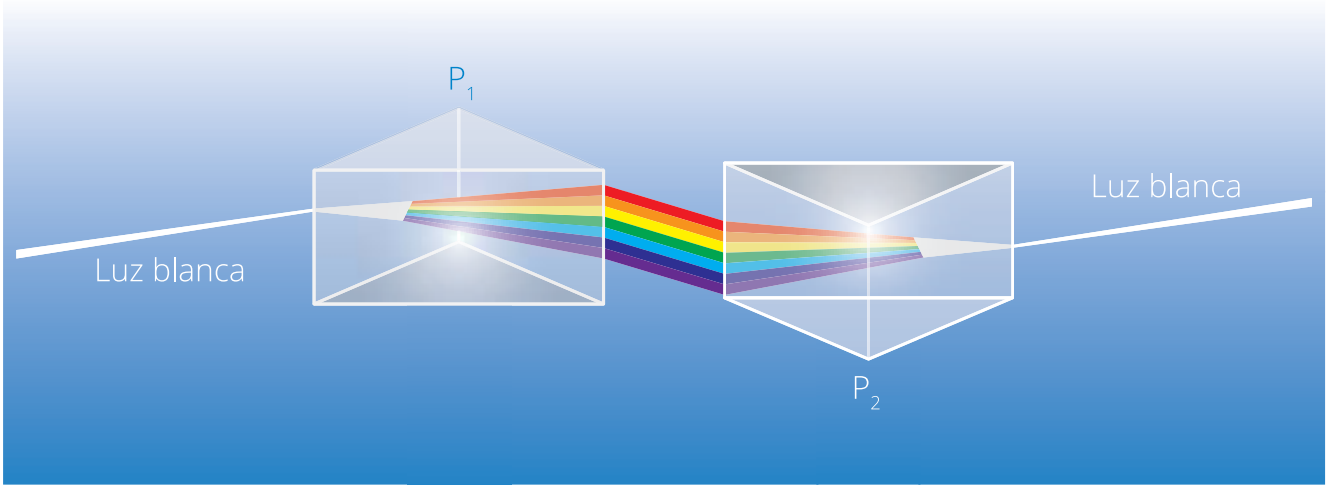


Figura 4-30.
Los dos prismas triangulares mostrando la dispersión de la luz blanca en los colores del arco iris, con el primero y la recreación de la luz blanca al hacer converger los haces de colores en un punto, con el segundo.

Isaac Newton (1642-1727) trabajó con la parte visible del espectro electromagnético. En febrero de 1672 publicó el artículo titulado "Una nueva teoría acerca de la luz y los colores", en el cual describe su demostración de la naturaleza de la luz blanca.En éste reportó que al hacer incidir luz blanca sobre una de las caras de un prisma triangular de vidrio, se obtenían siete franjas de distintos colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta. Estos colores son los que aparecen en el arco iris. Con esto demostró que la luz blanca puede descomponerse en otros colores. A este fenómeno se le denomina dispersión de la luz. Algo que lo maravilló aún más fue descubrir que si se mezclan los colores del arco iris, se obtiene nuevamente luz blanca. Esto lo comprobó colocando dos prismas consecutivos; el primero separaba los colores y el segundo los hacía converger y mezclarse en un punto, obteniendo nuevamente luz blanca.

Hay tres colores a partir de los cuales se pueden obtener los demás al combinarlos, éstos son, para la luz, el rojo, el azul y el verde y se les conoce como colores primarios.

Actividad

Elaborar con cartón blanco, un disco con sectores que contengan los colores del arco iris, en la debida proporción. Hacerle pasar un lápiz por el centro del círculo a modo que se construya una especie de perinola. Hacerla girar y observar lo que pasa con los colores plasmados en el círculo.

Si se observa con una lupa una parte blanca de la imagen producida por una pantalla de televisión o en un monitor de computadora, se podrá apreciar que cada segmento (*pixel*) está formado por tres elementos, cada uno con un color primario: rojo, verde y azul, lo que da lugar a las conocidas siglas RGB (*red, green, blue*).

El color que percibimos de los objetos es debido a la parte del espectro electromagnético que reflejan y que llega a los ojos. Un objeto se ve de color azul si absorbe todos los colores de la luz blanca que lo ilumina, reflejando sólo el azul. Se puede decir que la característica de color que cada objeto tiene es la de "seleccionar" qué colores de luz absorbe y cuáles refleja. Si un objeto absorbe todos los colores, se ve negro y, si los refleja todos, se ve blanco. Cuando el Sol ilumina las hojas de un árbol, se ven verdes, porque de la luz blanca que incide en ellas, se refleja el verde y se absorbe la luz de los colores restantes.

Aplicaciones de las ondas electromagnéticas

Desde fines del siglo XIX se hizo la primera transmisión telegráfica inalámbrica entre Gran Bretaña y Francia, mediante ondas electromagnéticas; obra de Guglielmo Marconi (1874-1937), lo que representó el inicio de las radiotransmisiones; también por aquellos años Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) descubrió los rayos X, y de inmediato se vislumbró su aplicación en los diagnósticos médicos. Luego, a principios del siglo XX, se iniciaron los estudios y experimentos que desembocaron en la transmisión de imágenes, esto es, la televisión. En la actualidad existen dispositivos como el teléfono móvil, el horno de microondas o el láser que tiene usos en la industria de la construcción, en intervenciones oftalmológicas o en la lectura y escritura de datos en los discos compactos.

¿Cómo funciona un horno de microondas?
El horno de microondas tiene un dispositivo denominado magnetrón, que genera ondas electromagnéticas cuya frecuencia es de alrededor de 10^{10} Hz, las cuales viajan a través de los alimentos e interactúan con sus moléculas de agua. Las microondas tienen justamente la frecuencia correcta para que las moléculas oscilen de manera que resuenen absorbiendo una gran cantidad de energía. A través de los choques con las moléculas vecinas, su energía interna se incrementa y esto hace que se eleve la temperatura de los alimentos que las contienen.

La luz como onda y partícula

Hasta principios del siglo XIX, la mayoría de los hombres de ciencia consideraba que la luz era una corriente de partículas (corpúsculos) emitidas por una fuente luminosa que estimulaba el sentido de la vista. Esta teoría había sido impulsada por Isaac Newton, por lo menos cien años atrás, y con ella explicaba la reflexión y la refracción de la luz. Y fue en vida de Newton que otro científico, el holandés Christian Huygens (1629-1695) planteó que la luz tenía comportamiento ondulatorio y explicó la reflexión y la refracción de la luz. Sin embargo, esta teoría no tuvo aceptación inmediata por diversas razones. Una, el gran prestigio que en esos años disfrutaba Newton, pero además, se daba por hecho que todas las on-

das habían de viajar en un medio material, y la luz viajaba desde el Sol a la Tierra a través del espacio vacío; por otro lado, se decía, si la luz fuera una propagación ondulatoria, esas ondas habrían de desviarse al llegar a un obstáculo, y no se observaba tal desviación, la luz siempre viajaba en línea recta. Hoy se sabe que esa desviación de la luz al llegar a la orilla de un objeto sí ocurre; se manifiesta mediante la difracción. De cualquier modo, la mayoría de los científicos de esa época rechazaron la teoría ondulatoria de la luz y se adhirieron a la teoría corpuscular impulsada por Newton, por más de un siglo.

Iniciado el siglo XIX, en 1801, Thomas Young (1773-1829) demostró que la luz manifestaba un comportamiento ondulatorio: interferencia. Pocos años después, el francés Augustin Fresnel (1788-1827) realizó experimentos de interferencia y difracción de la luz. Luego, en 1850, Jean Foucault (1819-1868) demostró que la velocidad de la luz en líquidos es menor que en el aire; con lo cual daba un golpe mortal a la teoría corpuscular que pregonaba que la velocidad de la luz sería mayor en líquidos y cristales que en el aire.

Fue así que en el curso del siglo XIX se generalizó la aceptación de la teoría ondulatoria de la luz. Vino luego la aportación teórica de James Clerk Maxwell, quien, en 1873, demostró que la luz era una propagación ondulatoria; ondas electromagnéticas de alta frecuencia que, de acuerdo con su teoría, debían viajar a una velocidad aproximada de 3×10^8 m/s, que coincidía con las mediciones experimentales de la velocidad de la luz que ya se conocían para entonces. La primera medición exitosa en ese sentido fue la del danés Ole Roemer (1644-1710).

Todo apuntaba a considerar a la luz como un fenómeno ondulatorio. Pero, a fines del siglo XIX, el físico experimental Heinrich Hertz (1857-1894), el mismo que en 1887 confirmó experimentalmente la teoría de Maxwell, descubrió el efecto fotoeléctrico; la expulsión de electrones de un metal expuesto a la luz. Una explicación de este fenómeno fue propuesta por Einstein en 1905 utilizando el concepto de fotones; "paquetes" discretos de energía. De acuerdo con esta propuesta, el efecto fotoeléctrico es la transferencia de energía de un fotón a un electrón del metal, y la energía de los electrones expulsados depende de la frecuencia de la luz incidente.

Así pues, la luz debe considerarse como un fenómeno de naturaleza dual. Por un lado, la teoría electromagnética ondulatoria explica la propagación de la luz,

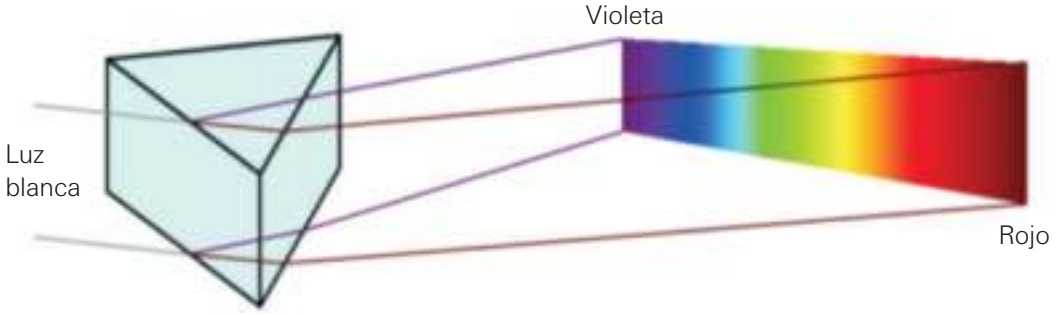


Figura 4-31. Dispersión de la luz blanca en los colores que la integran, al pasar por un prisma.

los fenómenos de interferencia y difracción; por otro lado, un modelo corpuscular ofrece una mejor explicación del efecto fotoeléctrico.

En 1871 el físico inglés lord Rayleigh (1842-1919) publicó un artículo dando explicación al azul del cielo, con base en la característica ondulatoria de la luz y, particularmente, hablando de la dispersión que ésta sufre al interactuar con las moléculas del aire, dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente. Encontró que la dispersión variaba de manera inversa con la longitud de onda de la luz, elevada a la cuarta potencia; esto es, a menor longitud de onda mayor dispersión; y de los colores que integran a la luz blanca, el azul es el de menor longitud de onda, de ahí que sea el color que sufre más dispersión y por ello el cielo se ve azul.

El arco iris, un fenómeno óptico espectacular

Isaac Newton en el siglo XVII, dio explicación a este fenómeno natural a partir del conocimiento de la dispersión de la luz blanca en los colores que la integran y de las nociones básicas de óptica geométrica. A continuación se verá con detalle cómo se forma el arco iris.

Para empezar, ha de tenerse presente que los colores que se ven en el arco iris son los mismos que se pueden ver al hacer pasar la luz blanca a través de un prisma triangular.

Respecto a la dirección del rayo de luz blanca original, el color que muestra mayor desviación es el violeta, y el de menor desviación, el rojo. De hecho, si se define un ángulo entre la dirección del rayo de luz blanca que llega al prisma y la dirección de cada rayo de color que de él sale, se tiene que el mayor ángulo corresponde al violeta y el menor al rojo. A los otros colores corresponden ángulos intermedios. Se puede decir que, el ángulo está relacionado con el color.

Ahora bien, para ver el arco iris es necesario que se den algunas condiciones: que haya gotas de agua en la atmósfera, que el Sol las ilumine y que la persona que observa al arcoíris tenga éste al frente y al Sol a sus espaldas.

La luz del Sol incide sobre una gruesa cortina de gotas de agua suspendidas en el aire. A cada gota llegan una infinidad de rayos de luz paralelos que inciden en diferentes partes de la superficie de la gota con diferentes ángulos de incidencia, dada la forma esférica de la gota.

Un rayo de luz procedente del Sol que incide sobre la parte superior de una gota de agua, al introducirse en la gota pasa del aire al agua y por ello se refracta acercándose a la normal, que en este caso, corresponde a una línea radial que pasa por el punto en que incide el rayo de luz en la gota. Pero, además de refractarse, se da en la luz blanca el fenómeno de la dispersión, mostrando los colores que la integran. El violeta se desvía más y el rojo menos. Al llegar los colores de luz a la pared interior de la gota, esto es, a la frontera agua-aire, se reflejan de acuerdo con la ley de la reflexión, que dice que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, respecto a la normal en el punto de incidencia.

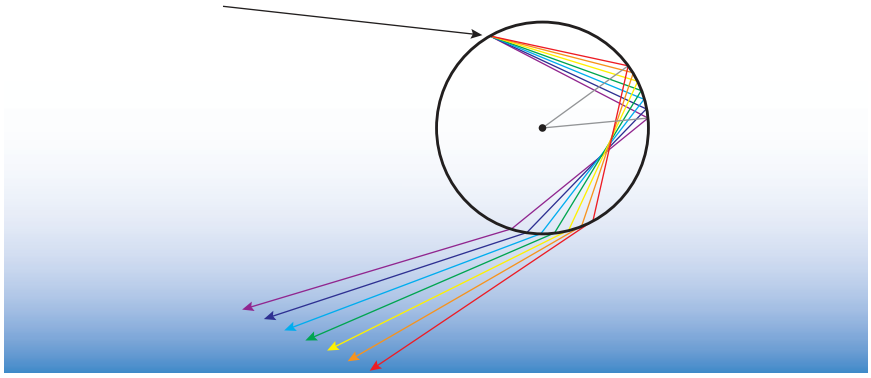


Figura 4-32. Mostrando la trayectoria que sigue el rayo de luz del Sol al incidir, entrar y salir de la gota de agua, destacando la dispersión de la luz blanca en los colores que la integran.

Luego de esa reflexión llegan los rayos de colores, nuevamente, a la frontera agua-aire y salen de la gota de agua hacia el aire, alejándose de la normal. Y esto ocurre en todas las gotas de agua suspendidas en el aire, sobre las que incide la luz del Sol.

De acuerdo con el esquema anterior, se ve la franja violeta arriba y la roja abajo, a la inversa de cómo se observa en la realidad. Se profundizará en el análisis para aclarar esta aparente contradicción. Considere dos gotas de agua suspendidas en el aire, ambas en una misma línea vertical y separadas una cierta distancia. A ellas, como a todas las demás, llegan los rayos solares paralelos. Se puede repetir el diagrama anterior para estas dos gotas, centrando la atención en la ruta que siguen los colores extremos del arco iris, esto es, el rojo y el violeta. El esquema quedaría de la siguiente manera.

Las dos gotas que se han dibujado serían las ubicadas en los extremos superior e inferior de la columna de gotas. Se destaca, en la figura 4-33, el efecto en el ojo de un observador a nivel del suelo, quien verá el arcoíris con la franja roja arriba y la violeta abajo.

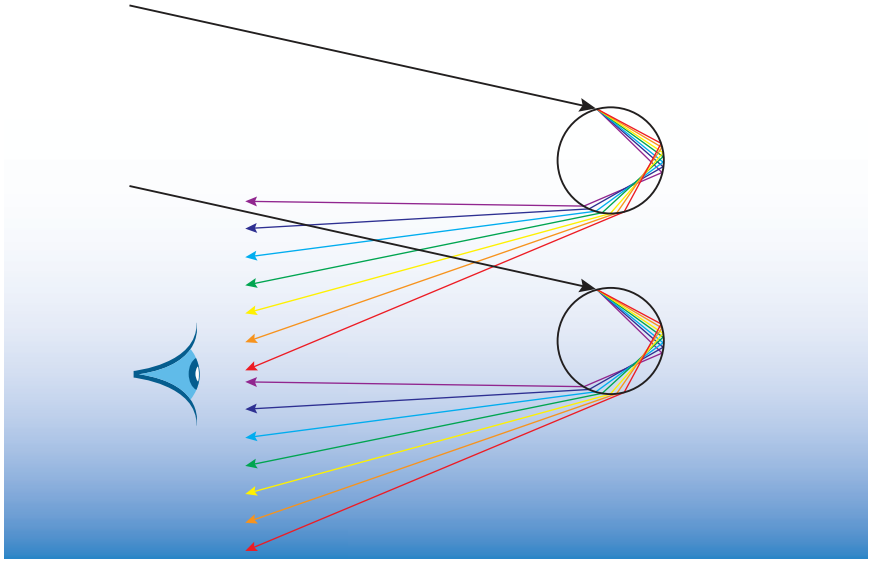


Figura 4-33. Esquema con diagrama para haces de luz solar incidiendo en dos gotas en una línea vertical.

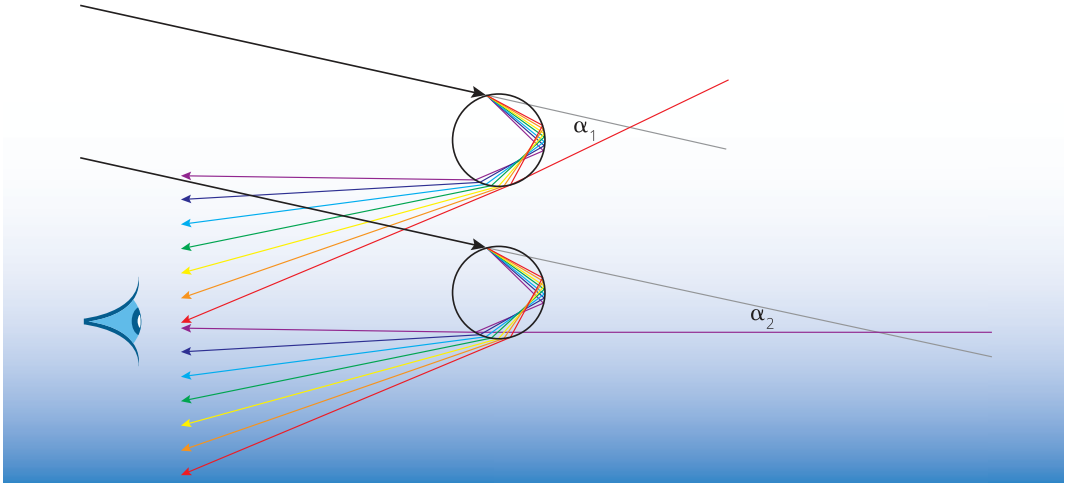


Figura 4-34. Esquema con los rayos solares incidiendo en las dos gotas de una columna vertical, y señalando los ángulos citados.

La ruta seguida por la luz al entrar y salir de cada gota de agua de esta columna es la misma en todas las gotas; esto es, a todas ellas llegan los rayos de luz provenientes del Sol con la misma dirección y de todas y cada una de ellas salen todos los colores del espectro, con una misma dirección para cada color. En el diagrama anterior se ha centrado la atención en la dirección en que salen los rayos violeta y rojo (los colores extremos del espectro) de las gotas de los extremos superior e inferior de la columna. Puede observarse que los rayos violeta que emergen de las dos gotas dibujadas son paralelos entre sí; asimismo, son paralelos los rayos rojos respectivos, y, aunque no se han dibujado, son paralelos los rayos de un mismo color emergiendo de cada gota.

Ahora bien, si se define un ángulo entre la dirección de la luz blanca incidente y la luz de color emergente de la gota, entonces se evidencia que estos ángulos son diferentes para los colores violeta y rojo, 40º y 42º 4′, respectivamente.

No debe olvidarse que se está haciendo referencia a toda una columna de gotas de agua suspendidas en el aire. Esto es, que entre las dos gotas que se han dibujado hay una infinidad de gotas más, en las que también se está dando el mismo fenómeno óptico y, lógicamente, el ángulo entre la dirección de la luz incidente y la de un mismo color emergente de cada una de esas gotas tiene un mismo valor. Un valor de ángulo para cada color. Dicho de otra manera, el ángulo determina al color que ve el observador en tierra.

Ahora, si sólo se contara con esa columna de gotas de agua suspendidas en la atmósfera, el observador en tierra sólo vería una franja vertical con los colores del arco iris, sin embargo, se tiene una gruesa cortina de gotas de agua suspendidas en el aire. A cada una de ellas llegan los rayos paralelos de luz blanca procedente del Sol, que inciden en su superficie esférica, de la cual emergen rayos de colores en todas direcciones. Sólo los rayos de colores que emergen de cada gota con los ángulos adecuados podrán ser vistos por un observador en tierra. Se puede imaginar al arco iris como compuesto de una sucesión de franjas de colores. La franja central es vertical, las de los costados son inclinadas y en los extremos se tienen franjas horizontales, lo que le da la forma de arco. Cada franja de colores

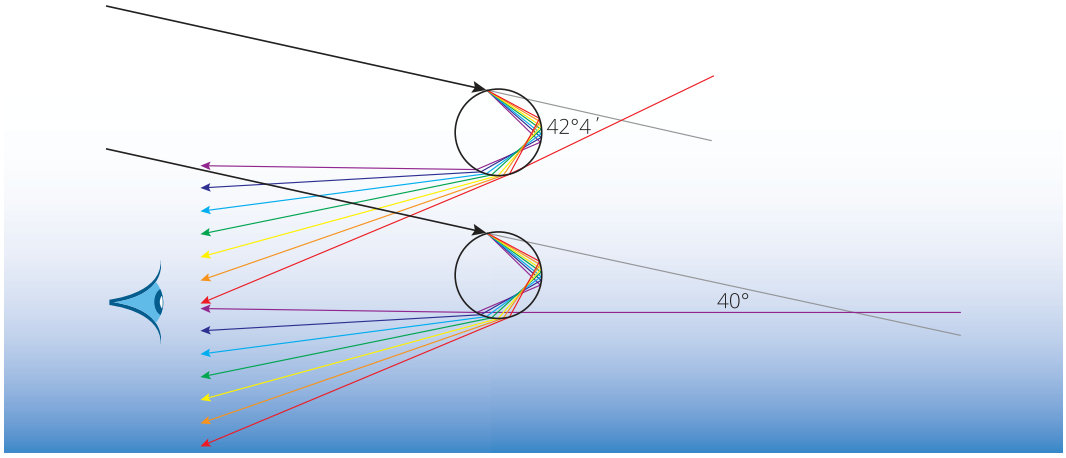


Figura 4-35. Observador viendo al arco iris. A sus ojos llegan los colores provenientes de dos gotas de una línea vertical. Se señalan los ángulos de 42°4′ y 40°.

puede ser vista debido a que llegan los rayos con los ángulos adecuados hasta el observador.

En la figura 4-35 se presenta un esquema que muestra cómo un observador en tierra ve el arco iris.

Se ha encontrado que, medido como se indica en la figura, el ángulo entre la luz blanca incidente y la luz de color emergente de la gota es de 42°4′ para el rojo y de 40° para el violeta, de modo que el arco iris tiende un ángulo de aproximadamente 2 grados.

Alguien podría preguntarse, qué sucede si el observador camina hacia adelante, hacia atrás, o hacia un lado. Para él, el ángulo podría cambiar y sin embargo, sigue viendo el arco iris, ¿cómo explicar que pueda seguir viéndolo? Puede seguir viendo el arco iris porque al cambiar de posición ahora ve las luces de colores provenientes de otras gotas de agua. El observador tiene enfrente una enorme cortina de gotas suspendidas en el aire, y de todas y cada una de ellas emergen luces de colores; pero el observador sólo ve las que llegan a sus ojos, en los ángulos adecuados.

Tópicos de óptica geométrica

Se abordarán ahora algunos temas de óptica geométrica, esto es, el estudio de las trayectorias que siguen los rayos de luz al incidir en espejos o en cuerpos transparentes (si se considera a la luz como un fenómeno ondulatorio, los rayos de luz representan la dirección de propagación de las ondas luminosas), en particular algunas lentes delgadas; esto nos permitirá explicarnos la formación y las características de las imágenes de los objetos iluminados colocados frente a espejos y lentes.

Reflexión de la luz en espejos planos

Los espejos planos son usados diariamente por las personas al realizar su arreglo personal antes de salir a sus actividades. Y es precisamente en ese momento cuando, al ver su imagen en el espejo, a la persona le da la impresión de que en esa imagen las cosas han sufrido una inversión horizontal. Para analizar si esto realmente sucede, es necesario introducirse en el estudio de la formación de imágenes en espejos planos.

En la figura 4-38 se muestra un lápiz colocado horizontalmente frente a un espejo plano. El lápiz está siendo iluminado por alguna fuente luminosa y desde todos los puntos de su superficie salen rayos de luz reflejada, y una parte de ellos inciden el espejo y se refleja con un ángulo igual al de incidencia respecto a la normal, lo que se conoce como la ley de la reflexión de la luz en espejos planos.

En la figura se muestran sólo dos rayos originados en la punta del lápiz que se reflejan en el espejo hacia el ojo del observador. Como se puede ver, los rayos divergen a partir de la punta del lápiz y se prolongan a partir del espejo al reflejarse. Así, estos rayos divergentes parecen provenir de un punto ubicado atrás del espejo. Un análisis semejante puede hacerse para los rayos de luz procedentes de cualquier otro punto de la superficie del lápiz y que inciden y se reflejan en el espejo para después llegar a los ojos del observador. La imagen del lápiz que el observador ve en el espejo se denomina imagen virtual, porque la luz no pasa en realidad por la posición de la imagen, pero se comporta como si en realidad hubiese un lápiz en esa posición. Como se puede ver, la imagen está atrás del espejo, a la misma distancia que el objeto real frente al espejo. También se confirma, gráficamente, que la imagen y el objeto son de igual tamaño.

A partir de lo anterior, se puede explicar por qué cuando una persona se mira al espejo, su imagen es de su mismo tamaño y se ve "dentro" del espejo, a una distancia de él, igual a la que la persona se encuentra frente al espejo; esto es, si la persona está a un metro del espejo, su imagen la ubica a un metro "dentro" del espejo. Otra cosa que se observa es que si la persona levanta la mano derecha, su imagen levanta su mano izquierda; y si levanta la izquierda, su imagen levan-

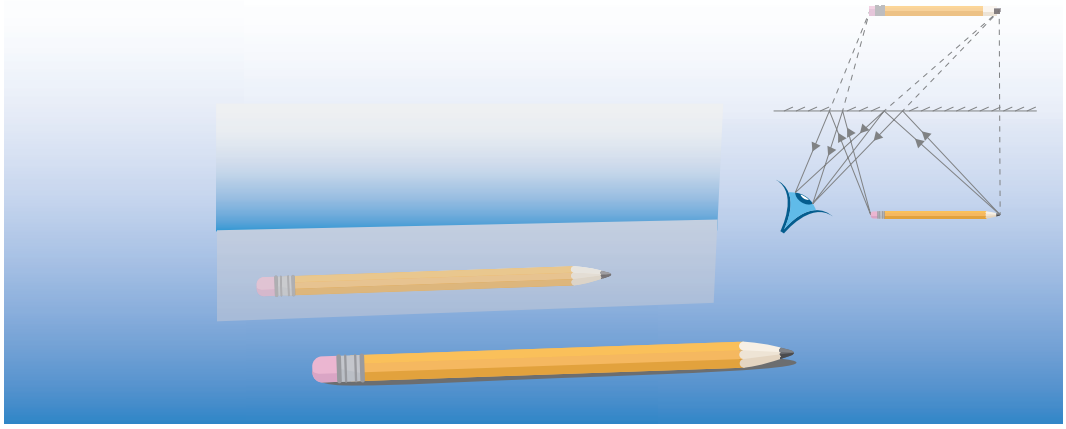


Figura 4-36. Lápiz horizontal frente a espejo.

ta la derecha. Así pues, parece que los espejos planos dan imágenes invertidas izquierda-derecha; pero no es así, no hay tal inversión; y eso se confirma con la imagen obtenida para el lápiz, en la figura anterior; no presenta tal inversión izquierda-derecha.

Suponga que una persona observa su imagen en un gran espejo plano colocado verticalmente en la parte trasera de un camión. Si el camión arranca y se aleja con velocidad constante de 5.0 m/s, ¿con qué velocidad se aleja, de esa persona, su imagen en ese espejo? Si se reflexiona un poco, se llega a la conclusión de que duplicándose la distancia, para el mismo tiempo, se duplica la velocidad, así que la imagen parece alejarse a una velocidad de 10.0 m/s.

Imágenes en espejos curvos

Estos espejos se usan en los retrovisores de los automóviles, en tiendas departamentales, como un recurso auxiliar en la vigilancia; o en la calle, en algunas esquinas, como un recurso para prevenir accidentes automovilísticos. Desde luego, también existen en algunos parques de diversiones, espejos con curvaturas particulares que dan imágenes chuscas de las personas que se paran frente a ellos.

Usualmente se estudia la formación de imágenes en espejos curvos empezando con aquellos que son un casquete de esfera hueca; esto es, espejos esféricos. Y en este caso se tienen dos tipos de espejos: cóncavos y convexos.

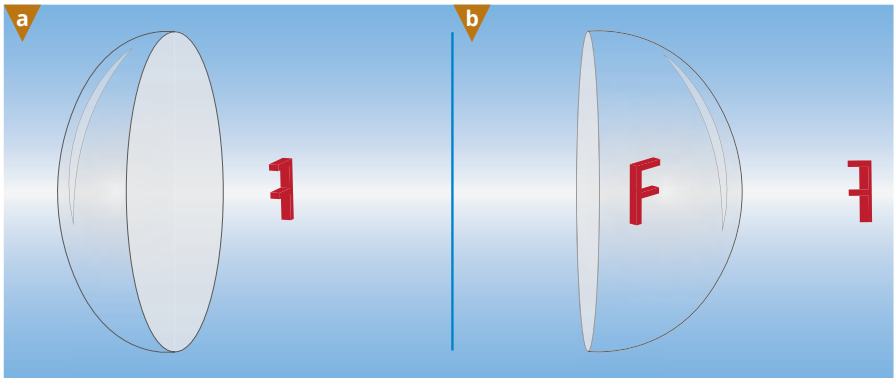


Figura 4-37. Espejos esféricos: *a)* cóncavo; *b)* convexo.

Una esfera de navidad es un buen ejemplo de espejo convexo, y da una imagen virtual y sin invertir, de menor tamaño que el objeto real. La ley de la reflexión de la luz sigue siendo válida para espejos curvos, aunque cabe destacar que en este caso las líneas normales son perpendiculares a la línea tangente a cada punto del espejo, de modo que cambian de dirección en cada punto.

Un espejo esférico cóncavo da imágenes invertidas o derechas (no invertidas), dependiendo de la distancia a la que el objeto se encuentre del espejo.

Antes de analizar cómo se forman estas imágenes es necesario tener presente que estos espejos se comportan de forma similar a los espejos parabó-

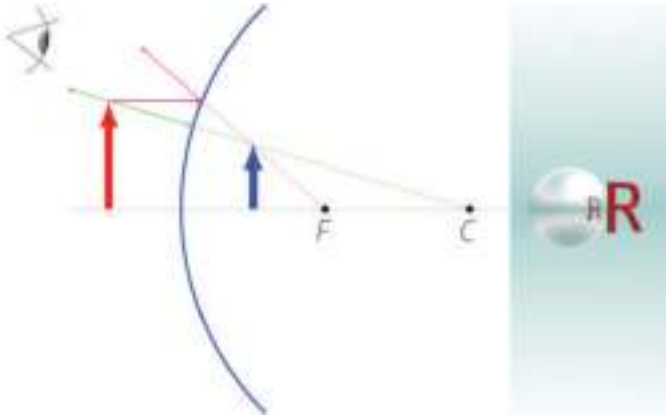


Figura 4-38. Imagen formada en un espejo convexo.

licos, donde los rayos de luz que llegan al espejo, y que son paralelos a su eje, se reflejan pasando por el punto focal, *F*, y que los rayos que llegan al espejo, pasando por el punto focal, se reflejan en dirección paralela al eje (como se muestran en las figuras 4-39a y 4-39b). Aquí se cumple también la ley de la reflexión de la luz. El punto focal o foco del espejo se encuentra en el punto medio entre el espejo y su centro de curvatura, en el caso de los espejos esféricos; esto es, $F = r/2$.

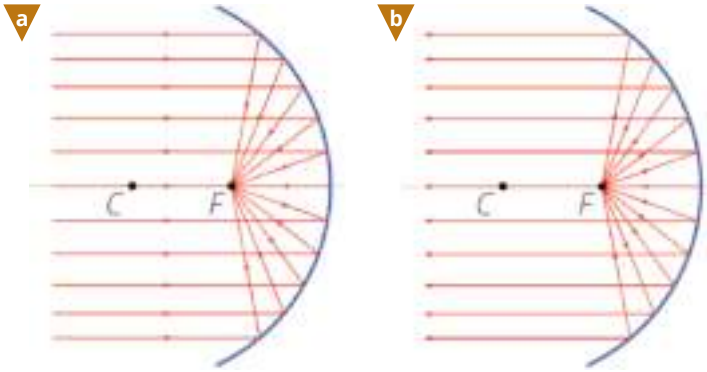


Figura 4-39. Rayos en el espejo cóncavo: *a)* cuando los rayos incidentes son paralelos al eje; *b)* cuando los rayos incidentes pasan por el foco.

Si el objeto se encuentra a una distancia mayor que la distancia focal —la distancia del espejo al foco, medida sobre su eje—, entonces la imagen será invertida y se formará donde convergen los rayos reflejados. En la figura 4-40 sólo se han dibujado tres de los rayos que proceden del objeto, los cuales bastan para describir a la imagen.

A esta imagen, debido a que se forma donde convergen los rayos de luz reflejados, se le denomina imagen real, y puede verse en una pantalla o registrarse en una película fotográfica colocada en ese lugar. Así, a partir de este breve análisis, se puede explicar por qué algunos espejos dan imágenes invertidas.

Ahora, si el objeto se encuentra frente al espejo cóncavo a una distancia menor que la distancia focal, entonces la imagen será derecha y virtual; esto úl-

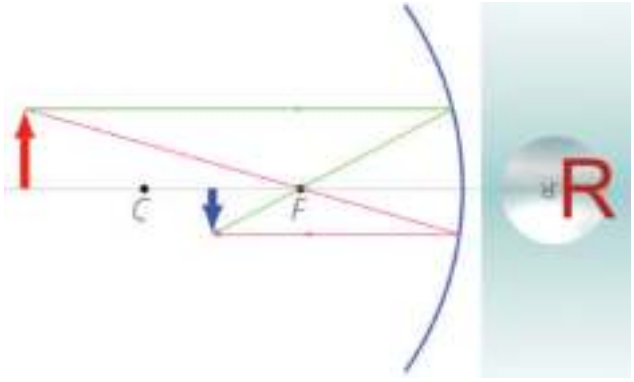


Figura 4-40. Formación de imágenes en espejo cóncavo.

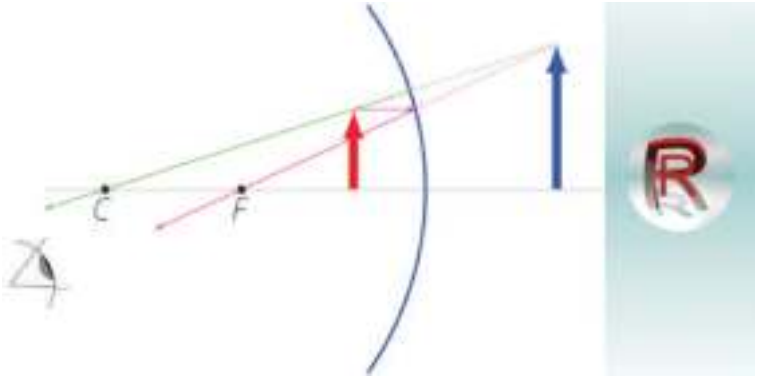


Figura 4-41. Formación de imagen virtual en espejo cóncavo.

timo dado que la luz no pasa realmente por la imagen, ya que ésta se forma detrás del espejo. Como se puede ver en la figura 4-41, la imagen, además de ser virtual y derecha, es más grande que el objeto real; de ahí que este tipo de espejos se utilice con frecuencia como auxiliar en la revisión de afecciones en la piel, ya que se obtienen imágenes amplificadas.

Refracción de la luz. Ley de Snell

Cuando la luz pasa de un medio a otro (ambos transparentes), ocurre que parte de la luz incidente se refleja en la frontera de los dos medios, y el resto pasa al otro medio. Aquí el centro de interés es la trayectoria que seguirá la luz al pasar de un medio a otro.

La velocidad de una onda cambia al pasar de un medio a otro y la luz no es la excepción, su velocidad también cambia al pasar de un medio transparente a otro. Ahora, si un rayo de luz incide formando un ángulo con la frontera entre los dos medios (diferente de 90º), se desviará al entrar al segundo medio; precisamente por el cambio que sufre en su velocidad, a esta desviación se le conoce con el nombre de *refracción*.

Así, cuando un rayo de luz pasa del aire al agua, el rayo refractado se acerca a la normal (línea imaginaria perpendicular a la frontera entre los dos medios y que pasa por el punto en que el rayo incidente la toca). Algo semejante ocurre

siempre que un rayo de luz pasa de un medio de bajo índice de refracción a otro de alto índice de refracción. El índice de refracción de cada medio transparente está relacionado con la velocidad de la luz en éste; concretamente, el índice de refracción de cierto medio se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío, *c*, entre la velocidad de la luz en el medio en cuestión, *v*; y se representa con la letra *n*. Así,

$$n = \frac{c}{v}$$

El índice de refracción no tiene unidades, pues es un cociente entre velocidades. Como puede sospecharse, el valor de *n* siempre es mayor que uno, pues en cualquier medio material transparente $v < c$. Nótese también, en este modelo matemático, que el índice de refracción de un medio transparente varía de manera inversa con la velocidad de la luz en ese medio; esto quiere decir que si *n* es pequeño, *v* es grande y viceversa. A continuación se presentan los valores de índice de refracción para algunas sustancias:

Tabla 4-1.

Sustancia	Índice de refracción (*n*)
Aire (0 °C , y 1 Atm)	1.000293
Agua	1.333
Alcohol etílico	1.361
Hielo	1.309
Vidrio sin plomo	1.52
Diamante	2.419

Si un rayo de luz pasa de agua a aire, el rayo refractado se aleja de la normal; esto ocurre siempre que un rayo de luz pasa de un medio con índice de refracción mayor a otro con índice de refracción menor. Así, cuando una persona se encuentra en una alberca, con el agua a la cintura, los rayos de luz procedentes de sus pies pasan del agua al aire, alejándose de la normal (véase la figura anexa) y un observador fuera de la alberca ve que los pies del bañista están más cerca de la superficie del agua de lo que realmente se encuentran, por eso las piernas se ven más cortas.

Con un razonamiento semejante se puede explicar por qué los peces en un estanque se ven como si estuvieran a una profundidad menor que aquella a la que realmente están.

En el siglo XVII Willebrord Snell (1591-1626) encontró experimentalmente la relación entre el ángulo de incidencia, θ_1, y el ángulo de refracción, θ_2, medidos respecto a la normal (figura 4-42):

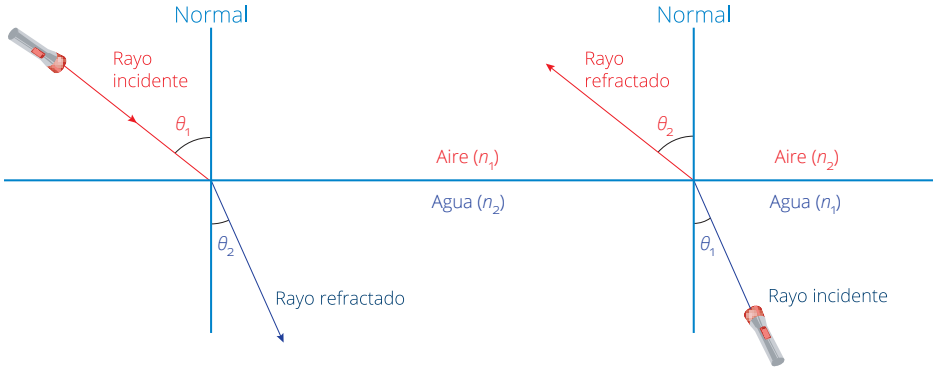


Figura 4-42.
Ley de Snell.

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los materiales transparentes donde se desplazan los rayos incidente y refractado, respectivamente.

A esta relación se le conoce con el nombre de *ley de Snell* y es la ley fundamental de la refracción de la luz.

Ahora se sabe que n_1 y n_2 están relacionados con la velocidad con que se desplaza la luz en cada uno de los medios transparentes, $n = c/v$ (donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio), cosa que en su tiempo Snell ignoraba, pues en los años en que vivió aún no se había medido la velocidad de la luz.

Es conveniente ver con detenimiento lo que, en este caso, dice el lenguaje matemático. Dado que la *ley de Snell* establece que $n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$, entonces, si $n_2 > n_1$, necesariamente debe cumplirse que $\theta_2 < \theta_1$, para que se cumpla la igualdad; y esto, en relación con el fenómeno óptico, quiere decir que si la luz entra en un medio donde n es mayor (y por ello, su velocidad menor), entonces el rayo se desvía acercándose a la normal. Pero, si $n_2 < n_1$, entonces $\theta_2 > \theta_1$, para que la igualdad se cumpla y en relación con el fenómeno quiere decir que el rayo de luz se desvía alejándose de la normal.

Cuando un rayo de luz llega de manera perpendicular a la frontera entre dos materiales transparentes, el rayo de luz pasa sin desviarse. Esto ocurre porque el ángulo de incidencia es cero, y de acuerdo con la ley de Snell el ángulo de refracción también es cero.

Si una persona estando bajo el agua, enciende una linterna dirigiendo el haz de luz hacia la superficie con un ángulo de 35° respecto a la vertical, ¿con qué ángulo saldrá el haz de luz del agua?

Se sabe que:

$$\theta_1 = 35°$$
$$n_1 = 1.333$$
$$n_2 = 1.000$$

y se quiere calcular θ_2:

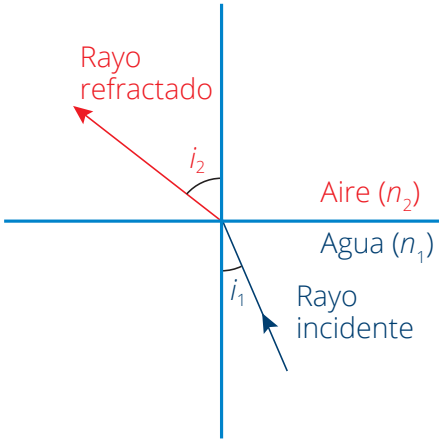


Figura 4-43.
Deformación de una imagen por la refracción en el agua.

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$
$$\operatorname{sen}\theta_2 = \frac{n_1 \operatorname{sen}\theta_1}{n_2} = \frac{(1.333)(\operatorname{sen}35°)}{1.000} = 0.7646$$

y aplicando la función inversa del seno (arco seno), se obtiene que θ_2 = 49.9°.

Ahora, si un buzo observa que en cierto momento del día los rayos del Sol bajo el agua forman un ángulo de 27° con respecto a la vertical (figura 4-44), ¿a qué ángulo por encima del horizonte se encuentra el Sol? Entonces, se quiere calcular θ_1, y se sabe que:

$$\theta_2 = 27°$$
$$n_1 = 1.000$$
$$n_2 = 1.333$$
$$\alpha = \text{ángulo por encima del horizonte} = 90° - \theta_1$$

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$
$$\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{n_2 \operatorname{sen}\theta_2}{n_1} = \frac{(1.333)(\operatorname{sen}27°)}{1.000} = 0.6052$$

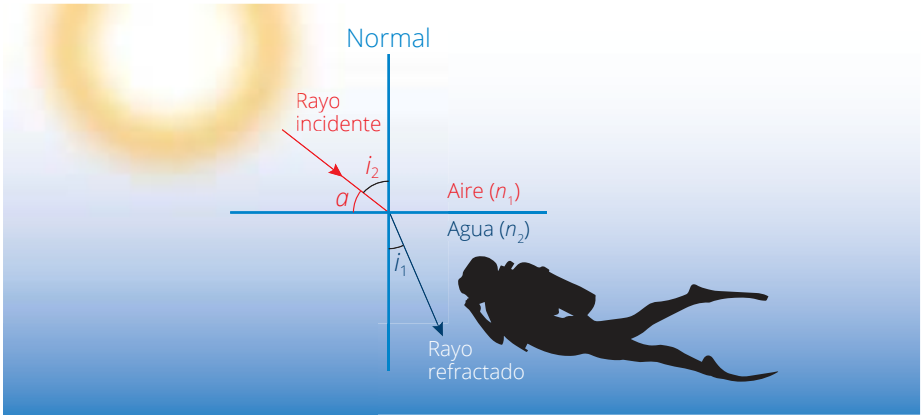


Figura 4-44.
Rayo refractado.

por lo tanto, $\theta_1 = 37.2°$, y entonces $\alpha = 90° - \theta_1 = 90° - 37.2° = 52.8°$. De manera que el Sol se encontraría a un ángulo de 52.8º por encima del horizonte.

Formación de imágenes con una lente delgada biconvexa

Microscopio simple, ley de los puntos conjugados

Una lupa es un instrumento conocido y usado en la vida cotidiana, es en realidad una lente biconvexa. Con ella se pueden obtener imágenes mayores que el objeto, y algunas veces, imágenes invertidas. Para entender cómo se forman estas imágenes, es necesario estudiar las trayectorias que siguen los rayos de luz que inciden en una lente biconvexa.

Se considera una lente convergente, es decir, una cuyas superficies son convexas, como la mostrada en la figura 4-45. El eje de la lente es una recta que pasa por su centro y es perpendicular a sus superficies. Todos los rayos de luz que inciden en ella, y son paralelos a su eje, se desvían, de acuerdo con la *ley de Snell*, y convergen en un punto sobre el eje, conocido como *punto focal* o *foco*, que se representa con la letra *F*. La distancia medida del punto focal al centro de la lente se conoce como distancia focal y se representa con la letra *f*.

Ahora, si a la izquierda de esa primera lente colocamos una segunda lente convergente, de manera que su foco coincida con el foco de la primera, entonces, de la segunda lente, y otra vez de acuerdo con la *ley de Snell*, los rayos de luz saldrán paralelos al eje de la lente (figura 4-46).

Para una lente biconvexa: un rayo de luz que incida en ella en dirección paralela a su eje, se refractará pasando por su foco, y un rayo de luz que incida en ella habiendo pasado por su foco, se refractará saliendo de ella en dirección paralela a su eje. Un rayo de luz que, desde cualquier dirección, incida en el centro de la lente, pasará por ella sin desviarse. Con base en el comportamiento de estos tres tipos de rayos de luz al pasar por una lente convergente, es posible predecir algunas características importantes de las imágenes que pueden formarse con una lente de este tipo. En la figura 4-47 se muestran la flecha roja como objeto y una

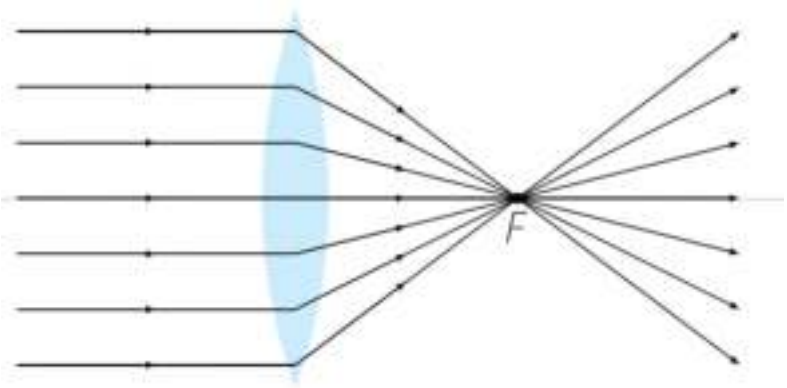


Figura 4-45. Rayos de luz paralelos incidiendo en lente convergente. Después de atravesar la lente convergen en el punto focal.

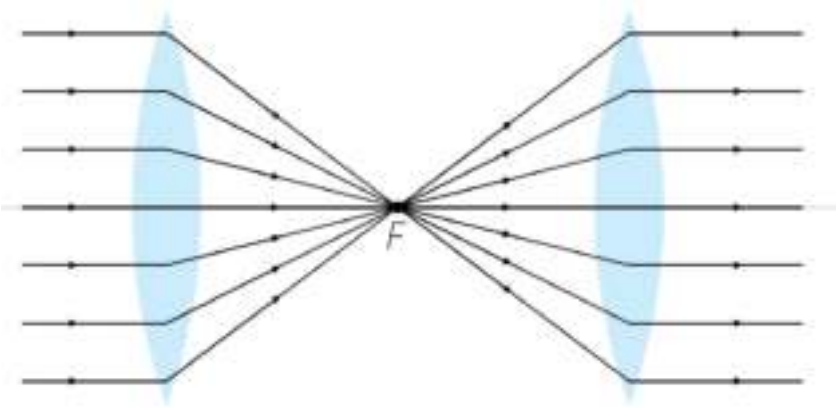


Figura 4-46.
Arreglo de dos lentes convergentes.

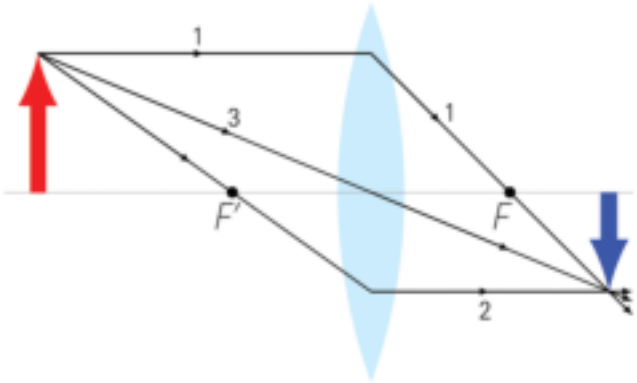


Figura 4-47.
Ubicación de la imagen formada por una lente convergente.

lente convergente que forma una imagen a la derecha. Seguiremos la trayectoria a sólo tres rayos de luz que salen de la parte superior de la flecha. El rayo 1 se dibuja paralelo al eje, por lo tanto, al ser refractado por la lente pasará por el punto focal *F*, situado detrás de ella. El rayo 2 se dibuja pasando por el punto *F'*, del mismo lado de la lente en que está el objeto, por lo tanto, emerge de ella paralelo al eje (los dos puntos focales son simétricos). Y el rayo 3 incide en el centro de la lente y pasa sin desviarse.

De hecho, con dos de estos rayos basta para localizar el punto correspondiente a la imagen del punto del objeto (la punta de la flecha, en este caso). Ahí donde se intersectan los rayos de luz, se localiza el punto imagen. Los puntos imagen correspondientes a los demás puntos del objeto pueden hallarse de la misma manera, hasta determinar la imagen completa del objeto. Como se puede ver, en este caso la imagen está invertida respecto a la orientación del objeto.

Una imagen como ésta es llamada imagen real, dado que los rayos de luz pasan realmente por la imagen y ésta puede ser captada en una pantalla, registrada en una película fotográfica o verse directamente.

De manera que, con una lente convergente pueden obtenerse imágenes reales e invertidas de los objetos, el tamaño de la imagen obtenida dependerá, como se verá a continuación, de la distancia a la que se encuentra el objeto de la lente.

Con estos diagramas de rayos, se puede explicar por qué, algunas veces, se ven imágenes invertidas con la lupa.

Se estudiará ahora, mediante el trazo de los rayos que inciden en la lente convergente, la imagen que se forma de un objeto situado frente a ella, a una distancia menor que su distancia focal, siguiendo la trayectoria de dos rayos que salen de la punta de la flecha roja (figura 4-48).

El rayo 1 se dibuja como en el caso anterior, incidiendo paralelo al eje de la lente y pasando por el foco opuesto al salir de la lente. Luego, el rayo 3 se dibuja fácilmente pasando por el centro de la lente sin desviarse. Como puede verse en el diagrama, estos dos rayos, al salir de la lente divergen; esto es, no se juntan en ningún punto, de modo que no pueden formar una imagen real; pero si estos dos rayos divergentes son proyectados hacia atrás, se encuentra el punto en que estas líneas convergerían; y en ese punto se forma la imagen de la punta de la flecha azul. De hecho, así se determina la posición en que se forma una imagen, y como puede verse, se trata de una imagen virtual, pues los rayos de luz, en realidad, no pasan por la imagen; además, es derecha y de mayor tamaño que el objeto.

En general, cuando un objeto se coloca frente a una lente biconvexa, a una distancia menor que su distancia focal, se obtiene una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.

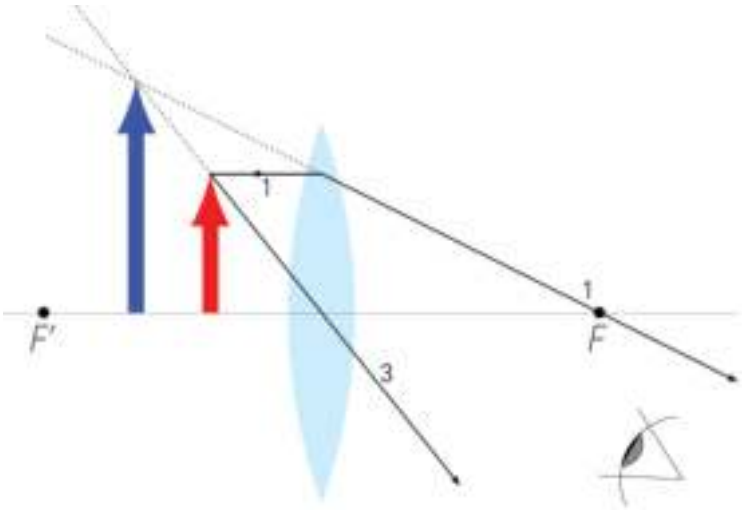


Figura 4-48.

Actividad

Usando una lupa, una lámpara, una cinta métrica y una hoja de papel blanco, pueden hacerse algunos sencillos experimentos que permiten conocer las características de las imágenes producidas por este tipo de lentes. Para encontrar la distancia focal de la lente, se necesita una fuente luminosa cuyos rayos sean paralelos, ésta puede ser el Sol, ya que la distancia a la que se encuentra de la Tierra es tan grande que se puede considerar que los

rayos que pasarían por la lente son paralelos. Al quemar un papel usando una lupa y la luz del Sol, lo que se hace es justamente encontrar el foco. Por lo tanto, la distancia que hay entre la lupa y el papel cuando éste se empieza a quemar es justamente la distancia focal.

Una vez conocida la distancia focal, se pueden realizar diferentes experimentos colocando la lámpara a diferentes distancias de la lupa, la hoja de papel al otro lado de esta lente para captar en ella la imagen de la lámpara. Se encontrará que si se pone la lámpara en el foco, no se observa ninguna imagen, ya que los rayos saldrían paralelos; si se coloca la lámpara entre el foco y dos veces la distancia focal, la imagen se proyectará amplificada e invertida, y la distancia a la que aparece la imagen nítida estará más allá del doble de la distancia focal del otro lado de la lente. Si se pone la lámpara exactamente al doble de la distancia focal, la imagen aparecerá del mismo tamaño y la distancia a la que aparece la imagen invertida es el doble de la distancia focal. Si ahora se pone la lámpara más allá de dos veces la distancia focal, se obtendrá una imagen invertida entre la distancia focal y dos veces la distancia focal, pero esta vez la imagen estará reducida.

Microscopio compuesto, telescopio, anteojos

En realidad, una lupa es un microscopio simple, y se pueden ver con ella imágenes amplificadas de los objetos. Entonces ¿qué ocurre si se toma como objeto una imagen real formada por otra lente? Cuando se proyecta la imagen de un objeto en una pantalla, se coloca a ésta en la posición donde "recoge" la formación de puntos luminosos correspondientes a puntos del objeto; pero aunque no se colocara la pantalla, los rayos de luz continuarían su camino, como si estuvieran "saliendo" de un objeto real. Entonces se puede tomar una imagen real como objeto de otra lente y conseguir así una mayor amplificación.

Considérese la figura 4-49. Con este arreglo se podría proyectar una imagen derecha de un objeto, y de su mismo tamaño.

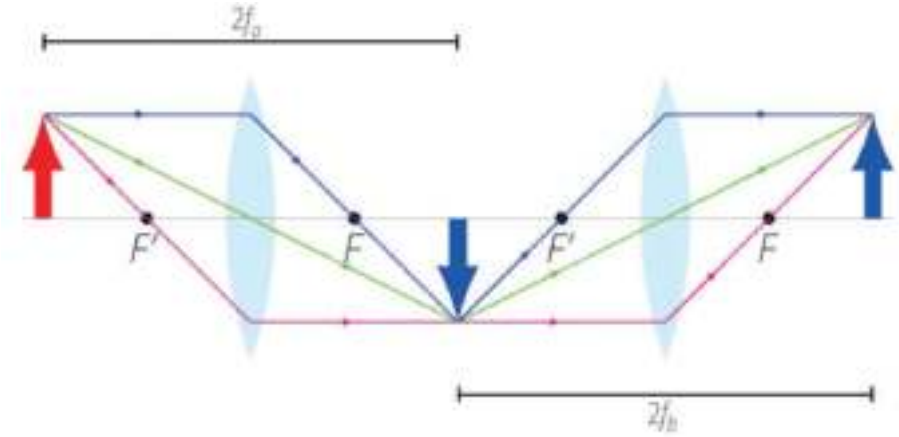


Figura 4-49. Proyección de una imagen derecha del mismo tamaño que el objeto.

En este caso se tienen dos lentes biconvexas, la primera de longitud focal f_a y la segunda, de longitud focal f_b. Se coloca el objeto a una distancia $2f_a$ de la primera lente, de manera que se forma una imagen real, invertida y del mismo tamaño a una distancia $2f_a$. Entonces, se coloca la segunda lente exactamente a una distancia $2f_b$ de la primera imagen, de manera que se forma una segunda imagen (derecha respecto al objeto real) a una distancia $2f_b$ de la segunda lente.

Con esto se obtiene una imagen real derecha y de igual tamaño que el objeto real usando dos lentes biconvexas. Pero, si se acerca la segunda lente a la primera imagen, de modo que la distancia sea menor que su distancia focal, un observador que mira en esta segunda lente (que llamaremos ocular) vería una imagen virtual y de mayor tamaño del objeto. Se puede obtener una mayor amplificación si la distancia del objeto real a la primera lente es pequeña y mayor que la distancia focal, de manera que con la primera lente se tenga un primer aumento y luego se utilice el ocular para conseguir un aumento aún mayor. Éstas son las bases del microscopio compuesto.

Galileo fue uno de los primeros científicos en utilizar un microscopio, incluso en Italia se considera que él fue el inventor de este instrumento, hacia el año de 1610. Sin embargo, las primeras publicaciones importantes en el campo de la microscopía aparecen en los años sesenta de ese siglo XVII por el médico italiano Marcelo Malpighi (1628-1694), quien probó la teoría del médico inglés William Harvey (1578-1657) sobre la circulación sanguínea al observar al microscopio los capilares sanguíneos y también por el científico inglés Robert Hooke (1635-1703) quien, al observar con un microscopio un delgado corte de corcho, descubrió y bautizó a las células de este material; de hecho ésa fue la primera observación de células muertas. También es de citar el biólogo y comerciante holandés Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), quien a mediados de ese siglo, utilizando microscopios de manufactura propia, describió por primera vez protozoos, bacterias, espermatozoides y glóbulos rojos. De manera, pues, que este invento fue un pilar importante del desarrollo de la biología y los estudios médicos. Al paso de los años los microscopios ópticos fueron perfeccionados y luego fueron surgiendo una gran variedad de nuevos microscopios con mayores resoluciones, hasta llegar a los modernos microscopios electrónicos.

Otro instrumento óptico cuyo funcionamiento se basa también en el empleo de dos lentes delgadas es el telescopio. Su uso ha contribuido al crecimiento y desarrollo de la sociedad. Aunque su invención, alrededor de 1608, se atribuye al comerciante holandés Hans Lippershey (1570-1619), quien era dueño de una fábrica de anteojos en Middelburg, Holanda, se reconoce que Galileo Galilei fue uno de los primeros en usar este tipo de instrumentos y sobre todo, que lo hizo para estudiar el cielo. Esto ocurrió en 1609, en Italia. Con un telescopio confeccionado por él mismo, en el cual utilizó una lente cóncava como ocular, Galileo observó la superficie de la Luna encontrando que tenía cráteres y montañas, esto es, no era aquella esfera perfecta que muchos habían imaginado. Observó también algunos satélites girando en torno a Júpiter y que Venus presenta fases como las de la Luna. Todas estas observaciones le dieron elementos para apoyar la tesis del sistema heliocéntrico de Nicolás Copérnico,

por lo cual fue enjuiciado por la Santa Inquisición. Pero, fue a partir de estas contribuciones de Galileo que, primero los sectores ilustrados de las sociedades y luego las poblaciones en general, empezaron a comprender y aceptar la posición y el papel de nuestro planeta en el sistema solar y en el universo. Es de destacar que de los tiempos de Galileo a la fecha actual, el telescopio ha ido perfeccionándose captando imágenes de cuerpos ubicados a muchos años luz de nosotros; e incluso en la actualidad se dispone de un potente telescopio puesto en órbita terrestre —el telescopio espacial Hubble— que utiliza espejos para lograr la amplificación.

Y bien, se ha mencionado que Galileo usó en sus telescopios una lente cóncava como ocular (la lente cercana al ojo del observador). Una lente cóncava, es decir, aquella que es más delgada en el centro que en los bordes, es una lente divergente puesto que hace que los rayos de luz que inciden paralelos a su eje, diverjan (véase la figura 4-50).

En este tipo de lentes el punto focal *F* es el punto del cual parecen emerger los rayos refractados que se originan en los rayos incidentes paralelos; y, desde luego, la distancia entre el punto *F* y la lente es la distancia focal *f*.

Un importante recurso o apoyo que las personas usamos para ver mejor son los anteojos, instrumentos ópticos de uso común que basan su funcionamiento en el empleo de lentes cóncavas y convexas.

Se dice que desde tiempos tan remotos como los de la Roma imperial, Nerón utilizaba una esmeralda moldeada en forma cóncava, de media luna, para mirar las peleas de gladiadores, debido a su miopía. Pero es alrededor del año 1000 de nuestra era, que el físico y matemático árabe Alhazen (965-1040) escribe un amplio tratado sobre óptica, en el cual describe cómo se forma la imagen en la

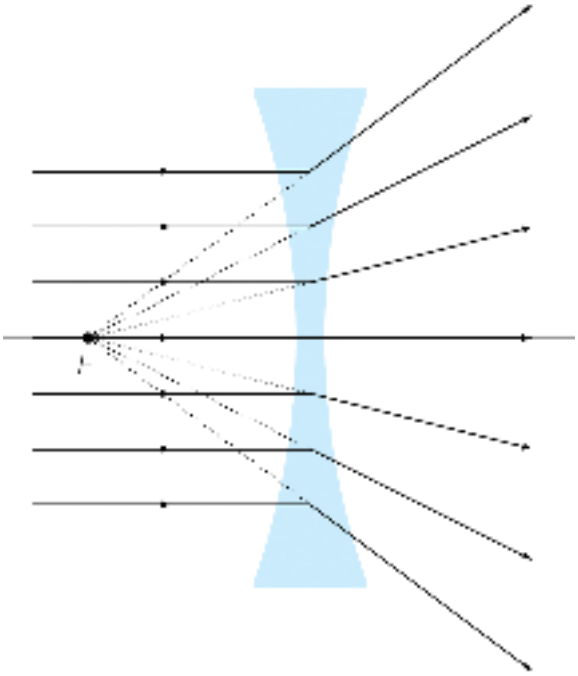


Figura 4-50. Esquema de rayos de luz paralelos al eje de la lente cóncava incidiendo en ella y saliendo divergiendo.

retina humana debido al cristalino del ojo, que es una lente convexa natural. Luego, alrededor de 1266 el fraile franciscano inglés Roger Bacon (1214-1294), talló los primeros lentes con forma de lenteja que ahora se conocen (de ahí su nombre de lentes) y describió las propiedades de una lente para amplificar la letra escrita. Así, a finales del siglo XIII en el norte de Italia, zona en que estaba muy desarrollada la tecnología del pulido de cristales, aparecen las primeras lentes convergentes.

Las primeras lentes se fabricaron para la presbicia; eran convexas y se idearon inicialmente para un solo ojo; luego se unieron dos de esos lentes en una sola armadura y se les agregó un mango para mayor comodidad. La armadura se colocaba sobre la nariz. Las lentes cóncavas para miopes aparecen cien años más tarde, aproximadamente. Se dice que ya las usaba el poeta y humanista italiano, Petrarca (1304-1374). Luego, con la invención de la imprenta en el siglo XV, se incrementó la demanda de anteojos. Los primeros anteojos bifocales se inventan en la segunda mitad del siglo XVIII. Se dice que Benjamín Franklin (1708-1790) fue de los primeros en usarlos. Así pues, aquellos primeros estudios sobre lo que hoy denominamos óptica geométrica, realizados por el físico árabe Alhazen, dieron las bases para esos dispositivos tan útiles a la sociedad en su necesidad de ver mejor.

Ahora, se darán algunas nociones sobre el funcionamiento de los anteojos en su papel de corregir defectos visuales. Los optometristas y los oftalmólogos utilizan el recíproco de la distancia focal ($^1/_f$) para referirse a la intensidad de las lentes —ya sean convergentes o divergentes— para anteojos. A $^1/_f$ se le conoce como la *potencia de la lente*.

$$P = \frac{1}{f}$$

La unidad de potencia de una lente es la dioptría (D); $1D = {}^1/_{\text{m}} = 1\ \text{m}^{-1}$. Así, por ejemplo, una lente que tenga 50 cm de distancia focal, tiene una potencia $P = {}^1/_{0.50}\ \text{m} = 2.0\ \text{m}^{-1} = 2.0\ D$; esto es, dos dioptrías. Nótese que la potencia de una lente varía de manera inversa con la distancia focal de la misma, esto es, distancia focal pequeña, potencia grande y viceversa.

Dos fallas o defectos frecuentes en la visión de las personas son la incapacidad de ver claramente objetos lejanos y la incapacidad de ver con claridad objetos cercanos. Estos dos defectos se pueden corregir con ayuda de las lentes.

Figura 4-51. Esquema de ojo miope. Dos casos: uno, llegan al ojo rayos de luz paralelos y convergen dentro del ojo, antes de llegar a la retina y el segundo esquema antepone una lente cóncava al ojo de manera que los rayos que a ella inciden paralelos, luego diverjan un poco para que luego de pasar por el cristalino converjan en la retina.

La miopía es la incapacidad de ver con claridad objetos lejanos, ocurre en un ojo cuyo globo ocular es demasiado alargado y por lo cual, la imagen de los objetos se forma delante de la retina. Una lente divergente, que hace que los rayos de luz que llegan a ella paralelos, se separen, permite que los rayos se enfoquen y formen una imagen nítida en la retina corrigiendo el defecto (figura 4-51).

Por su parte, la hipermetropía consiste en la incapacidad de ver con claridad los objetos cercanos, lo que dificulta la lectura.

Este defecto ocurre en un ojo cuyo globo ocular es corto y los rayos de luz convergerían atrás de la retina. Esta falla en la visión se puede corregir con una lente convergente (figura 4-52).

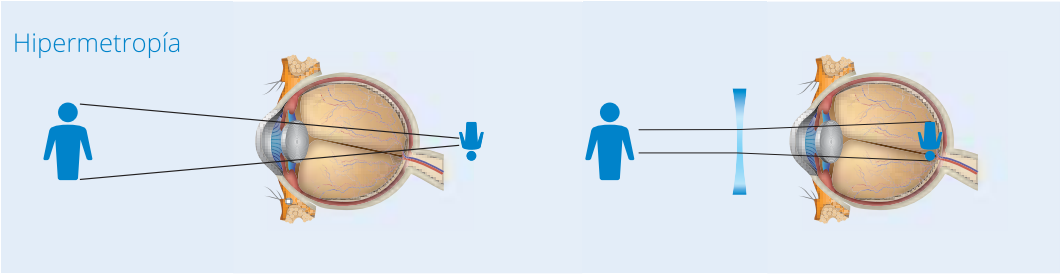


Figura 4-52. Esquema de ojo hipermétrope. Dos esquemas: uno muestra la convergencia de los rayos de luz, atrás de la retina y el segundo muestra la corrección usando una lente convergente, para que los rayos de luz converjan en la retina.

5 | Conocimiento, sociedad y tecnología

El universo

Teoría de "La gran explosión"; evidencias que la sustentan, alcances y limitaciones

Se dice que alguna vez todo el universo estuvo concentrado en un solo punto, una especie de huevo primordial que, por alguna razón, estalló. Hoy, de aquella gran explosión, sólo se percibe su proceso expansivo, de modo que sólo interpretando las evidencias, es posible asegurar que la gran explosión es un hecho.

Un brillo variable

A principios del siglo XX, Edward C. Pickering (1846-1919) en el observatorio del Harvard College, se ocupaba de detalladas observaciones estelares. Para realizar el tedioso trabajo de observar y analizar miles de fotografías, comparar brillos, hacer gráficas y cálculos, Pickering contrató a mujeres del lugar, en su opinión, más adaptadas para aquel tipo de labor. A pesar de sus contribuciones, aquellas observadoras prácticamente no fueron reconocidas por la comunidad astronómica de su tiempo. Tal vez por eso resalta más la obra de una de ellas: Henrietta

Figura 5-1.
El universo.

Swan Leavitt (1868-1921), quien habría de establecer un método revolucionario para la medición de grandes distancias. Hija de un ministro congregacional, sorda, de modales reservados y notablemente brillante, Leavitt llegó a ser jefa del departamento especializado en medir el brillo estelar, según quedaba registrado en las fotografías. Su trabajo se centró en las placas, obtenidas durante varios años por un telescopio que el observatorio de Harvard tenía en las montañas del Perú, que mostraban un enjambre estelar muy conocido por los observadores del hemisferio sur: la Pequeña Nube de Magallanes.

Figura 5-2.
Variable cefeida.

Leavitt se encontró con numerosos casos de estrellas cuyo brillo variaba cíclicamente. En virtud de que la primera de éstas fue la estrella Delta, en la constelación de Cefeo, se les conoce como estrellas variables *cefeidas*. Las cefeidas se expanden y contraen con regularidad; como consecuencia, brillan intensamente, se apagan, para luego volver a brillar repitiendo el ciclo. El lapso de tiempo en que se repite este ciclo, es decir, el periodo de una variable cefeida puede ser tan corto como un día o tan largo como varios meses. Sea cual sea el ritmo, por lo general, la periodicidad tiene una sorprendente precisión de uno o dos minutos.

Para 1908, Leavitt había compilado una lista de más de un millar de tales variables en la Pequeña Nube de Magallanes.[1] Dieciséis de ellas aparecían en suficientes fotografías como para poder determinar sus periodos. De su detallado estudio empezó a surgir una curiosa característica: *mientras más largo es su periodo, mayor es su brillo máximo*.

1. Henrietta S. Leavitt, "1777 variables en las nubes de Magallanes", *Annals of Harvard College Observatory*, vol. 60, pp. 87-108. 1908.

En 1912, cuando ya había ampliado su estudio a 25 cefeidas, publicó un artículo en el que mostraba que el brillo y el periodo están ligados matemáticamente. Más aún, que todas las cefeidas entran en una sola escala. Puesto que estas estrellas variables se hallan, probablemente, a casi la misma distancia de la Tierra, sus periodos están aparentemente asociados a su emisión real de luz.[2]

2. Henrietta S. Leavitt y Edward Pickering, C. "Periodos de 25 estrellas variables en la pequeña Nube de Magallanes", *Harvard College Observatory Circular*, vol. 173, pp. 1-3, marzo de 1912.

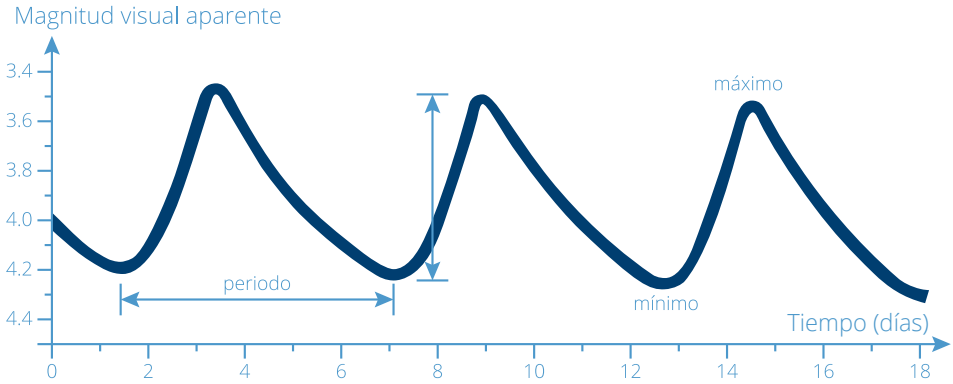


Figura 5-3.
Gráfica de la magnitud visual aparente vs. tiempo.

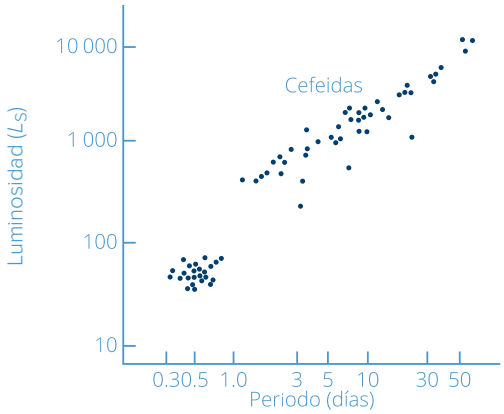


Figura 5-4. Gráfica de luminosidad *vs.* periodo.

El resultado fue impactante: Henrietta Leavitt había encontrado la manera de conocer el brillo intrínseco de una estrella. De aquí, el brillo aparente, que es el que se ve desde la Tierra, permite establecer la distancia a la que se encuentra.

Grandes distancias

Si la magnitud absoluta del brillo de una cefeida cercana podía medirse, comparándola con las más lejanas de igual periodo, la diferencia entre las magnitudes de brillo absoluto y aparente, daría las distancias con sólo considerar que éste disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia a la que se encuentre.

También, en 1917, existía el debate sobre la identidad de las nebulosas espirales. Sin embargo, los fotógrafos de las espirales empezaron a notar la existencia de objetos cercanos a ellas que incrementaban notablemente su brillo. Se pensaba que esto se debía a que muchas estrellas sufrían una erupción de materia que multiplicaba su brillo. Este comportamiento explicaba que estrellas con poco brillo de pronto se mostraran más brillantes que sus vecinas dando la impresión de ser una estrella nueva. Esto dio origen a su nombre latino: *nova*.

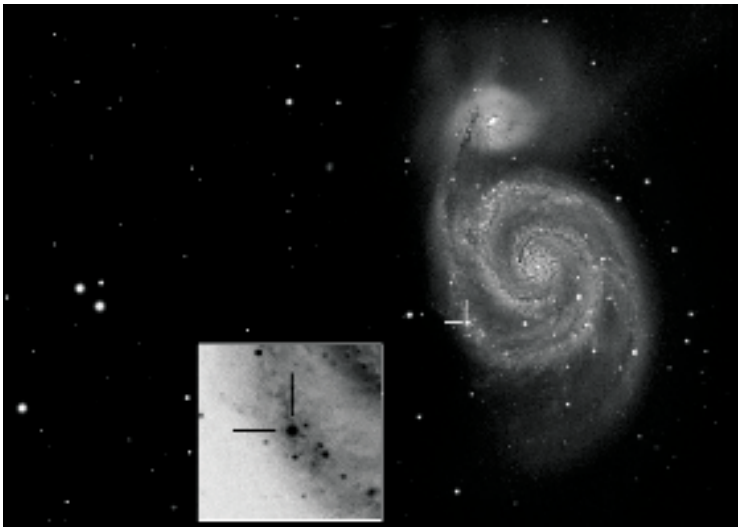


Figura 5-5. Supernova cerca del núcleo de la galaxia M-51.

Figura 5-6.
Parte de la Vía Láctea.

Parecería razonable que, casualmente, alguna nova estuviera ubicada en la línea de observación de una nebulosa espiral; pero el que hubiera varias forzó otro tipo de preguntas, como: ¿es posible que estas novas formen parte de la espiral? o más aún, ¿las nebulosas espirales que son invisibles para los más poderosos telescopios, son un conglomerado de estrellas?

Si las nebulosas espirales son del mismo tipo que las observadas en el agrupamiento estelar, el brillo promedio de aquellas novas, decenas de miles de veces más débiles, indicaría que están un centenar de veces más lejos. Algunos astrónomos empezaron a calcular las distancias que surgían de esta hipótesis.

Los resultados indicaban que las nebulosas espirales estaban mucho más alejadas de la Vía Láctea, incluso para el tamaño más grande aceptado para nuestra galaxia.

Para gente como Harlow Shapley (1885-1972) estas observaciones eran pruebas inequívocas de que las espirales son galaxias independientes, universos isla. Sin embargo, cuando formuló su teoría *La Gran Galaxia*, cambió de opinión. La Vía Láctea, tal como la imaginaba, era demasiado grande para que todas las espirales fueran comparables. De acuerdo con lo anterior, las espirales debían estar mucho más lejos de lo que indicaban las novas.

Grandes velocidades

Desde 1912, en el observatorio Lowell de Flagstaff, Arizona, un espectroscopista hábil y paciente llamado Vesto Slipher (1875-1969), estudiando una galaxia espiral de la constelación de Andrómeda, midió su desplazamiento Doppler y, usando los cálculos de Fizau, determinó su velocidad. El resultado fue impactante: la nebulosa de Andrómeda se está acercando a la Tierra a una velocidad de 300 $^{km}/_{s}$.[3] Ésta era la velocidad más grande jamás medida para algún objeto celeste.

Para 1914, Slipher había determinado la velocidad, según la línea de observación, de quince nebulosas espirales. Para sorpresa de todo el mundo, trece de ellas se

3. V. M. Slipher, "La velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda", *Lowell Observatory Bulletin,* no. 58, vol. II, pp. 56-57, 1913.

Figura 5-7.
a) Nebulosa espiral.
b) Nebulosa M-51.

están alejando, algunas a casi 800 $^{km}/_{s}$; más del doble que la velocidad de aproximación de Andrómeda. Para Heber Doust Curtis (1872-1942), descubridor de las novas, y otros astrónomos, aquél era un poderoso argumento a favor del universo isla. Las velocidades de las espirales son demasiado grandes para estar ligadas gravitacionalmente a la Vía Láctea.

Es variable

Hale estaba preparándose para contratar al personal que habría de operar el telescopio de 2.5 m que pronto se concluiría en Monte Wilson, en las montañas de San Gabriel en California, e invitó a Hubble (1889-1953) para que fuera uno de los que lo usaran.

En 1919 Hubble empezó a clasificar nebulosas. Él creía en la teoría del universo isla y esperaba que el enorme telescopio de 2.5 m de Monte Wilson le ayudara a validarla. Pero ni siquiera este poderoso instrumento podía capturar inequívocamente estrellas individuales en las fotografías de las espirales. En algún momento creyó ver estrellas, pero sus colegas se mostraron escépticos. De cualquier forma, ver estrellas no resolvía nada si no se podía determinar la distancia a las espirales.

Sin embargo, las fotografías de las espirales ya eran suficientemente nítidas como para mostrar los puntos de luz que Curtis había identificado como novas y Hubble centró su atención en ellas. En 1923, cuando trabajaba con varias fotografías de Andrómeda, reexaminó un punto de luz al que había marcado con *N* para identificarla como nova. Revisó placas anteriores encontrando que el cambio de brillo era periódico. Eufórico, tachó la *N* y escribió *variable*. La hasta entonces nova se comportaba exactamente como una variable cefeida.

Figura 5-8.
Nota original de Hubble.

Finalmente, Hubble tenía una forma de determinar la distancia a la nebulosa de Andrómeda. La cefeida en la espiral era muy débil, mucho más que las que Shapley había descubierto en los cúmulos globulares. Usando la calibración de Shapley, Hubble obtuvo que la nebulosa de Andrómeda, la M-31 en los catálogos, estaba a 900 mil años luz de distancia, mucho más allá de la Vía Láctea. La conclusión entonces fue contundente: Andrómeda es una galaxia independiente, completamente desarrollada. Hubble no se apresuró a enviar su artículo. La relación del periodo con la luminosidad todavía era muy controvertida como indicador de distancias. En uno de sus últimos trabajos Edwin Hubble escribió:

> "Con el incremento de las distancias nuestro conocimiento se desvanece, y se desvanece rápidamente hasta que en el último e impreciso horizonte buscamos, entre fantasmales errores de observaciones, puntos de referencia que apenas son más sustanciales. La búsqueda continuará. El ansia es más antigua que la historia. Nunca resulta satisfecha, y nunca podrá ser suprimida."

Recesión galáctica

Siguiendo los pasos de Slipher y Hubble, el astrónomo estadounidense Milton Lasell Humason (1891-1972) retomó el trabajo sobre las velocidades radiales de las galaxias. Comenzó a tomar fotografías que tomaban días enteros de exposición para registrar los espectros de galaxias cada vez más tenues. Entre las galaxias más débiles descubrió velocidades mucho mayores a las captadas con anterioridad.

En 1928, Humason midió la velocidad radial de la galaxia NGC 7619, obteniendo 3 800 $^{km}/_{s}$.[4] Hacia 1936 estaba midiendo velocidades de 40 mil $^{km}/_{s}$, más de un octavo de la velocidad de la luz. Y siempre se trataba de movimientos de alejamiento.[5]

Las velocidades que se estaban midiendo eran tan grandes que los astrónomos empezaron a poner en tela de juicio la interpretación Doppler del corrimiento al rojo.

Un corrimiento hacia el rojo podría interpretarse como que la fuente se está alejando, o bien que la luz de las galaxias lejanas se ven enrojecidas por el polvo fino del espacio intergaláctico. Hubo quien propuso que, en ocasiones, por su interacción con el polvo, la luz pierde energía.

Dicha pérdida se traduce en un alargamiento de la longitud de onda, por lo tanto su espectro se habría corrido hacia el rojo. Así, este corrimiento no se de-

4. M. L. Humason, "¿Está el universo expandiéndose?", *Astronomical Society of the Pacific Leaflets*, vol. 2, p.161, 1936.

5. M. L. Humason, "No. 531, La velocidad radial aparente de 100 nebulosas extragalácticas", *Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington*, vol. 531, pp.1-13, 1936.

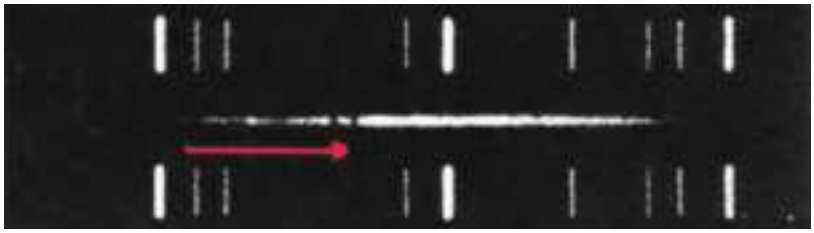


Figura 5-9. Corrimiento hacia el rojo.

bería a grandes velocidades de recesión de las galaxias, sino a que se recibe la luz "cansada".

Por el contrario, en algunas galaxias, la desviación medida puede ser hacia el azul, lo cual podría significar que la luz gana energía en su viaje.

En resumen, la interpretación más aceptada del corrimiento al rojo es que unas galaxias se alejan de la Tierra a velocidades muy grandes y otras, muy pocas, se acercan. A este fenómeno de alejamiento se le llama *recesión galáctica*.

Hubble siguió trabajando, paralelamente a Humason. Había logrado estimar la distancia a las galaxias. En 1929, Hubble usó los resultados de Slipher y Humason encontrando que la velocidad de recesión de las galaxias aumentaba proporcionalmente a la distancia que nos separaba de ellas.[6] Una galaxia que se encuentra dos veces más alejada de la Tierra, se aleja con una velocidad del doble.

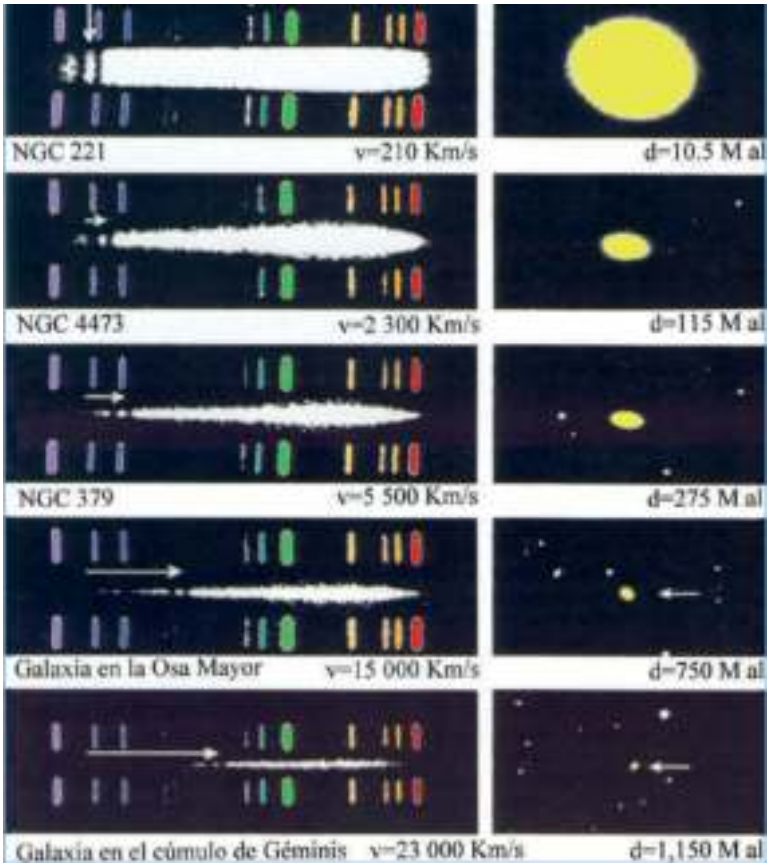


Figura 5-10. Corrimiento hacia el rojo de diferentes galaxias.

A este comportamiento se le conoce como *ley de Hubble*. Graficando la velocidad de recesión *v*, contra la distancia *r*, se obtiene una recta. La pendiente *H* es conocida como la *constante de Hubble*. Esto es

$$H = \frac{\Delta v}{\Delta r}$$

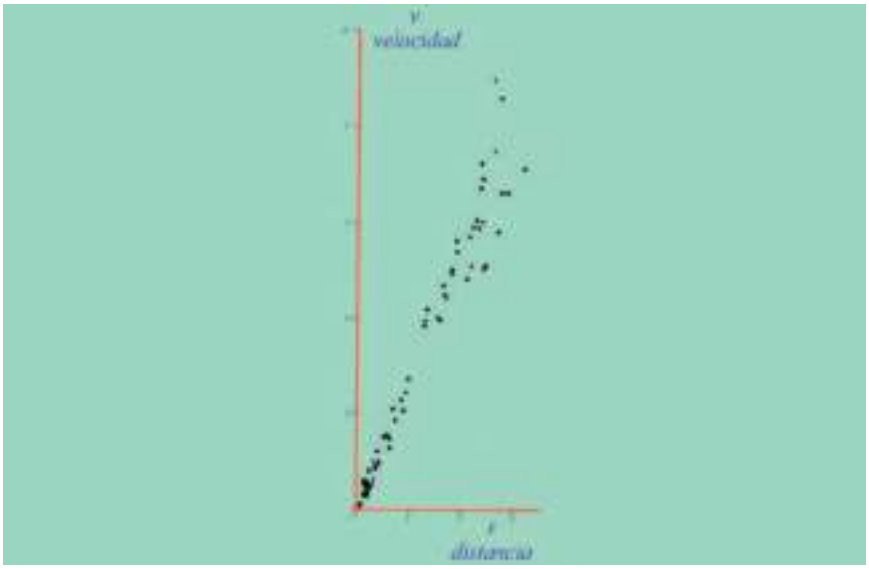


Figura 5-11. Gráfica de velocidad de recesión vs. distancia a algunas galaxias.

6. Edwin P. Hubble, "Una relación entre la distancia y la velocidad radial entre nebulosas extragalácticas", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 15, no. 3, pp. 168-173, marzo de 1929.

En donde $\Delta v = v - v_0$ y $\Delta r = r - r_0$. En este caso la gráfica pasa por el origen, en consecuencia es posible tomar los puntos iniciales v_0 y r_0 como cero. Entonces $H = v/r$. La forma más común de encontrar la *ley de Hubble* es

$$v = Hr$$
$$\text{con } H = 2.3 \times 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}$$

Por supuesto, lo más desconcertante de la *ley de Hubble* era que la Tierra parecía ser el centro del universo y que todas las galaxias se alejaban como si fuera el centro de su movimiento de expansión.

Se ve lo mismo

Considere muchas galaxias alineadas, que disten r entre dos consecutivas. ¿Qué vería un observador situado en cualquiera de ellas? Por la ley de Hubble $v = Hr$, $2v = H2r$,... entonces la galaxia de referencia, la 4 en la figura, tendrá $v = 0$; la primera de la derecha lleva v, la segunda $2v$, la tercera $3v$, y así. Simétricamente, hacia el lado izquierdo la primera tiene $-v$. La segunda $-2v$, y así. El signo negativo es porque llevan dirección contraria (figura 5-12).

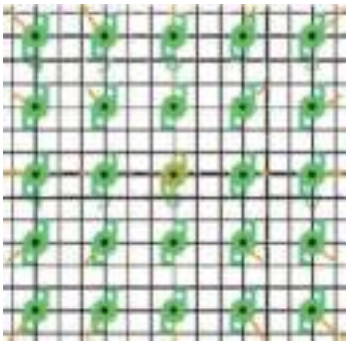


Figura 5-12. Las galaxias alejándose.

Considere otra galaxia cualquiera como segundo punto de observación, por ejemplo, la 6. Para este segundo observador, su galaxia lleva una velocidad $v_2 = 0$, mientras que para el primero era $2v = v_1$. De esta forma se cumple que

$$v_2 = v_1 - 2v$$

Haciendo la operación para cada galaxia, se llega a que el segundo observador ve el mismo comportamiento en las velocidades que el primero, es decir, se cumple la *ley de Hubble* pero ahora como si él fuera el centro. El resultado será el mismo al tomar cualquier otra galaxia.

Entonces, desde cualquier punto del universo se ve que las demás galaxias se alejan. Pareciera entonces que todo punto es el centro. La linealidad de la *ley de Hubble* implica que todo lugar del universo es equivalente. Y para que desde cualquier punto del universo se vea lo mismo, la *ley de Hubble* debe ser lineal.

El huevo cósmico

Suponga ahora que mira hacia atrás en el tiempo, que se invierte la dirección de la expansión universal, como una película que corre hacia atrás, se observaría entonces que las galaxias se aproximan unas a otras con velocidades conocidas.

El Cosmos estaría sometido a un proceso de contracción en que todas las galaxias llegarían a reunirse en un solo punto; como si todo lo que pudiera existir hubiese estado reunido, alguna vez, en un mismo lugar, el "origen del universo".

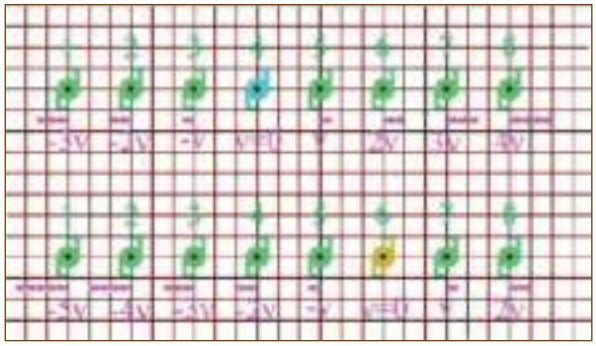


Figura 5-13.
Galaxias alineadas.

En 1927, el astrónomo belga Georges Édouard Lemaître (1894-1966) sugirió que, en el tiempo cero, toda la materia y energía del universo se hallaban efectivamente comprimidas en una gigantesca masa cuyo diámetro no rebasaba unos cuantos años luz, a la que Lemaître llamó el *huevo cósmico*.

La velocidad V, tal vez constante, con la que se mueve la galaxia debe ser $V = {}^{\Delta d}/_{\Delta t}$; siendo Δt el tiempo transcurrido desde el estallido. Despejándolo, tenemos $\Delta t = {}^{\Delta d}/_{V}$. En nuestro caso, $\Delta d = r$; y, por la ley de Hubble, $V = Hr$. Entonces

$$\Delta t = \frac{1}{H}$$

Lo cual implica que la edad del universo es, justamente, el inverso de la constante de Hubble.

El huevo cósmico era inestable y estalló en la más fantástica y espectacular explosión que es posible imaginar. Los fragmentos de dicha explosión se convirtieron en las galaxias, que fueron violentamente despedidas en todas direcciones; efecto que aún se observa como la recesión galáctica, según Lemaître.

El modelo del huevo cósmico, su explosión y sus remanentes, parecía incluir los razonamientos de Einstein, Friedman y de Sitter, así como las observaciones de Slipher, Hubble y Humason. Aquello fascinaba al astrónomo ruso-americano George Gamow (1904-1968), quien impulsaría fuertemente esta teoría.

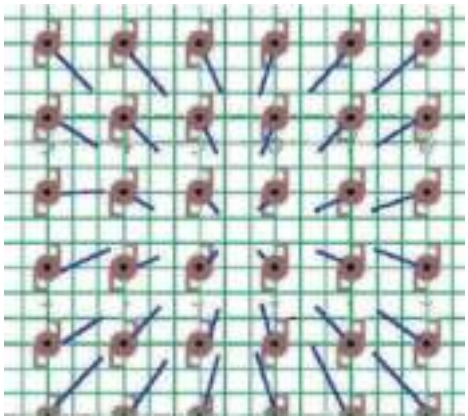


Figura 5-14.
Galaxias contrayéndose.

Figura 5-15.
Observatorio de Penzias y Wilson.

La radiación fósil

En 1960, los Laboratorios Bell construyeron una antena gigante en Nueva Jersey como parte de un sistema pionero para la transmisión vía satélite llamado Eco. Sin embargo, un par de años después se lanzó el satélite Telstar haciendo obsoleto al sistema Eco.

Mientras tanto, el alemán Arno Penzias (1933-) y Robert Wilson (1936-) astrónomos especializados en ondas de radio pensaron que la antena de Holmdel podría ser usada como un gran telescopio de radio con el que podrían continuar sus observaciones (figura 5-15).

Cuando comenzaron a usarlo como *radiotelescopio* (figura 5-16), detectaron que había un ruido de fondo (como la estática en un radio). Ésta era una señal uniforme en la gama de las microondas que parecía venir de todas direcciones.

Figura 5-16.
Radiotelescópio.

Llegaron a pensar que el ruido era generado por el telescopio mismo, lo que no sería raro. Aquel ruido no interfería con el sistema Eco pero sí lo hacía con las observaciones que Penzias y Wilson habían planeado.

Verificaron todas las posibles fuentes de aquel exceso de radiación. Colocaron la antena en una dirección perpendicular a la ciudad de Nueva York y observaron que no era interferencia urbana, tampoco era la radiación proveniente de nuestra galaxia o de fuentes de radio extraterrestres.

El ruido permaneció igual durante un año y no podía venir del sistema solar, ni de la prueba nuclear subterránea realizada en 1962, porque a un año habría mostrado una disminución.

Finalmente, los radioastrónomos decidieron medir las características de la radiación y encontraron que correspondía a la de un cuerpo negro cuya temperatura estaba alrededor de los 3 K. Enseguida, empezaron a buscar explicaciones teóricas.

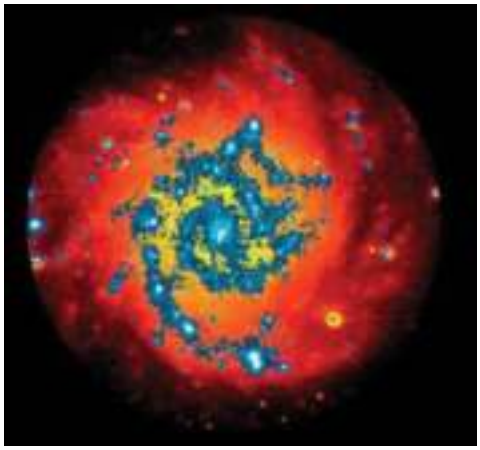


Figura 5-17. Representación imaginaria de la gran explosión.

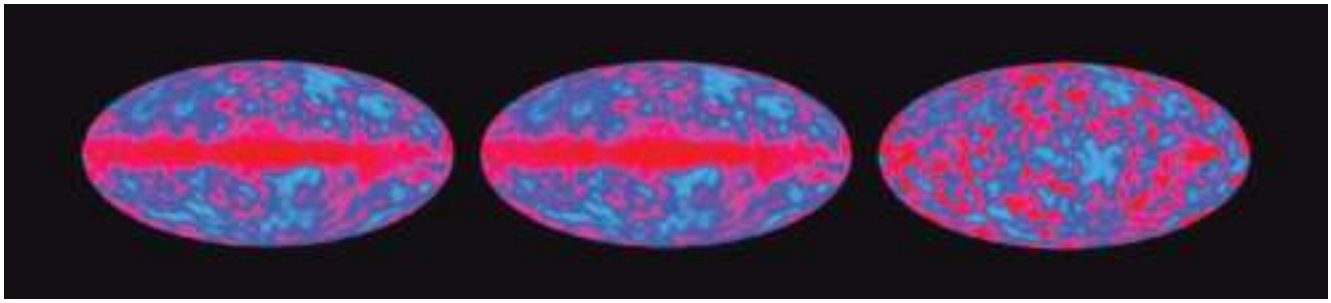
Al mismo tiempo, Robert Dicke (1916-1997) estudiaba teorías sobre la gran explosión. Había elaborado una, sugiriendo que, si se dio ésta, entonces el residuo de la explosión podría haber tomado la forma de una radiación de fondo de bajo nivel por todo el universo. Dicke buscaba evidencia para esta teoría cuando Penzias y Wilson se comunicaron con su laboratorio y Dicke compartió sus ideas con ellos.

Curiosamente, Wilson había sido formado en la teoría del estado estacionario y se sentía incómodo con la explicación de que el ruido de radio que detectaba surgiera de la gran explosión. Cuando, conjuntamente Penzias, Wilson y Dicke publicaron sus trabajos, los investigadores de los Laboratorios Bell insistieron en que fueran "sólo los hechos", simplemente informar las observaciones registradas. Así que las contribuciones fueron escritas por separado, dos cartas publicadas juntas, una seguida de la otra. La de Dicke y sus colaboradores contenía la reflexión teórica: si el universo tuvo un origen singular, pudo haber sido extremadamente caliente en sus estadios tempranos.

Se preguntaban si el universo pudo haberse llenado con una radiación de cuerpo negro a partir de este posible momento de alta energía.

El artículo de Wilson y Penzias era de un poco más de una cuartilla, y en él se exponían los detalles técnicos de su trabajo y se reportaba su resultado: la tempe-

Figura 5-18. El universo.



ratura remanente en la antena es de 3.5 ± 1.0 K medida con 4080 MHz.[7] Hoy en día se ha precisado este dato, llegando a una temperatura de un poco menos de 3 K.

Muchos investigadores, tanto teóricos como experimentales, se habían encontrado con este fenómeno antes, sin percatarse de su trascendencia. En parte porque, como Steven Weinberg escribió, "en el decenio de 1950, se pensaba que el estudio del universo temprano no era del tipo de cosas a las que un científico respetable debía dedicar su tiempo". Todo cambió con el trabajo de Penzias, Wilson y Dicke.

La medida de la *radiación cósmica de fondo* (el "ruido" del telescopio de Holmdel), combinada con el hallazgo de Edwin Hubble sobre la recesión galáctica, le dio un gran impulso a la teoría de la *gran explosión*.

Arno Penzias y Robert Wilson recibieron el Premio Nobel de física en 1978.

7. A. Penzias, R. Wilson, *Astrophysical Journal*, vol. 142, pp. 419-420, 1965.

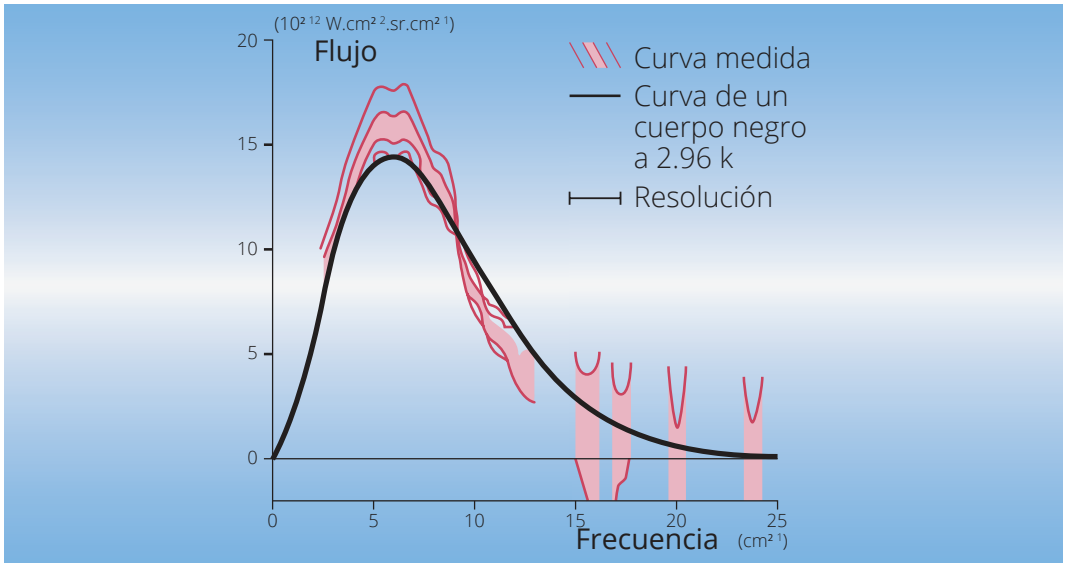


Figura 5-19. Flujo como función de la frecuencia.

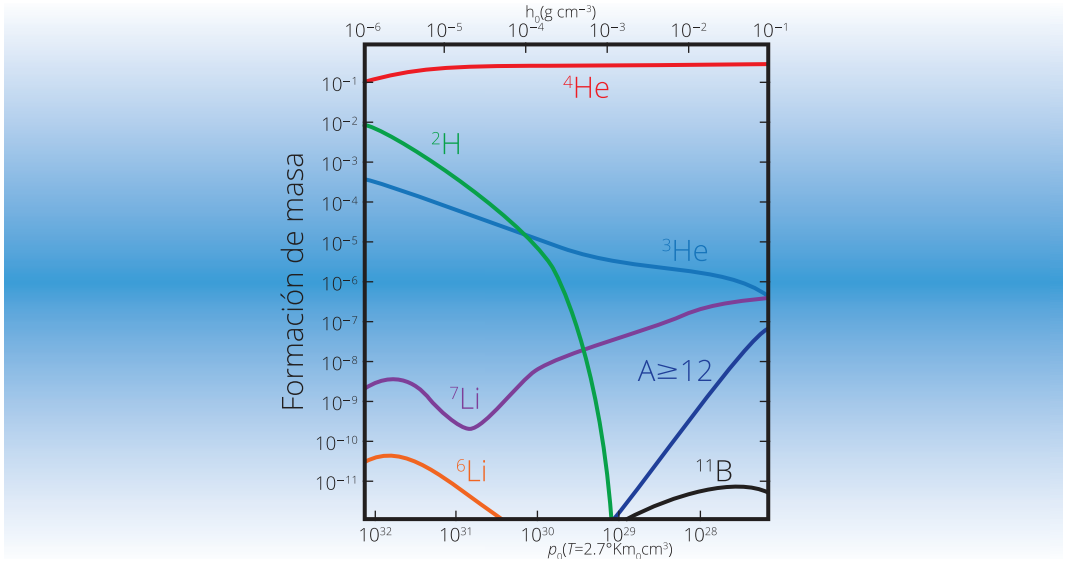


Figura 5-20. Fracción de masa como función de la densidad.

La tercera evidencia

La década de 1970 se caracterizó por el trabajo enfocado a cálculos sobre la evolución química que debió sufrir el universo en caso de que se hubiera dado un evento tan espectacular como la gran explosión, la cual debería manifestarse con la aparición de elementos más complejos que el hidrógeno. Entre otros, el astrónomo Robert V. Wagoner[8] había obtenido varias combinaciones posibles de elementos químicos, las cuales dependían de las condiciones predominantes durante los primeros minutos de la gran explosión.

8. R. V. Wagoner, *Astrophysical Journal*, vol. 179, pp. 343-360, 1973.

A mediados de esa década, empezaron a llamar la atención los resultados observacionales del astrónomo mexicano Manuel Peimbert Sierra (1941-) sobre la similitud de las proporciones de elementos químicos medidas en objetos celestes muy distantes entre ellos, como si provinieran de un mismo proceso que actuó por todas partes.

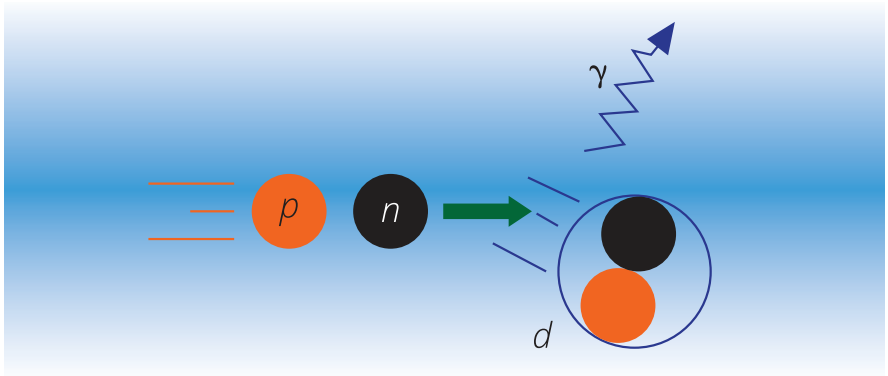


Figura 5-21. Reacción que dio origen a los deuterones.

De la figura 5-21:

$$p+n \rightarrow d+\gamma$$

Cuando la temperatura cósmica era del orden de 10^{10} K, las reacciones nucleares debían producir átomos de deuterio a partir de neutrones y protones, pero debido a que la temperatura era muy alta, enseguida se destruirían. Así que no era posible formar elementos más pesados que el hidrógeno. Al disminuir la temperatura del universo, el deuterio se volvió estable y fue posible, a partir de reacciones nucleares de deuterio con protones, formar partículas de ^{3}He (se lee como helio-3); es decir, un isótopo de helio con dos protones y un neutrón.

$$p+d \rightarrow {}^{3}He+\gamma$$

Finalmente, con el ^{3}He y un átomo de deuterio es posible producir un átomo de ^{4}He, que está formado por dos protones y dos neutrones.

$${}^{3}He+d \rightarrow {}^{4}He+p$$

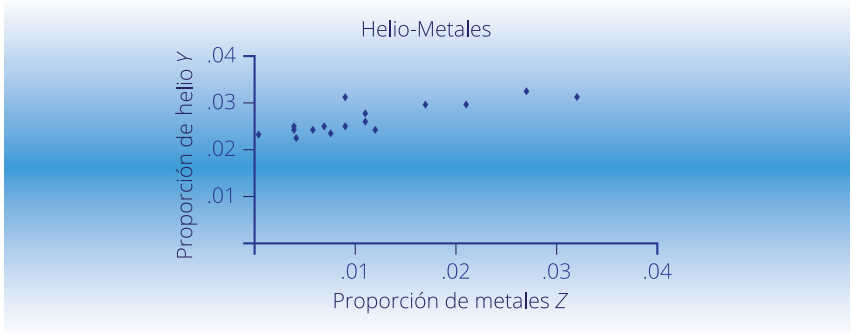


Figura 5-22. Proporción de helio como función de la proporción de metales.

Actualmente, la mayoría de los átomos de helio del universo observable son ^{4}He. Después de formarse este isótopo, la temperatura y la densidad cósmicas disminuyeron lo suficiente como para que ya no fuera posible constituir más elementos pesados. Después de los primeros cuatro minutos, probablemente la temperatura disminuyó hasta unos 800 millones de grados Kelvin, por lo que las reacciones nucleares se detuvieron. Desde este momento, la composición química del universo se mantuvo constante, constituida fundamentalmente por hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de deuterio y litio. En teoría, de acuerdo con el proceso de la gran explosión, la composición química no volvería a modificarse sino hasta la formación de las galaxias y las estrellas, dos mil millones de años después.

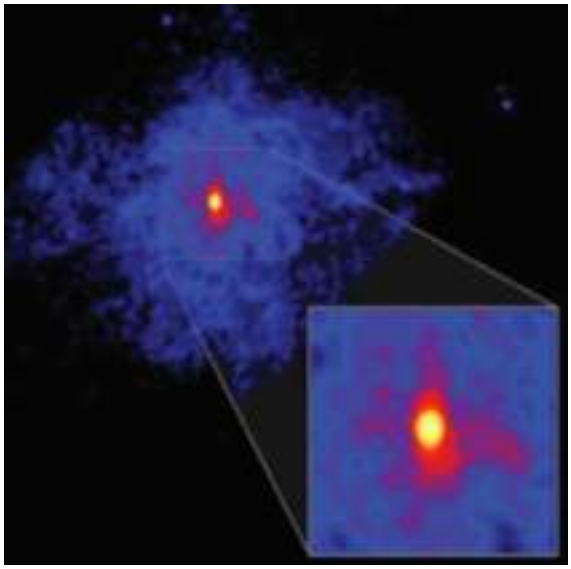


Figura 5-23. Amplificación de una galaxia.

Peimbert, estudiando el espectro de emisión de las nebulosas de gas, determinó la composición química del medio interestelar. En nuestra galaxia y en otras en las que ha sido posible determinar con precisión su composición química, se ha encontrado que los seis elementos más abundantes son: hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno y el neón. Las abundancias relativas de estos elementos en el medio interestelar se pueden obtener a partir de analizar el espectro de emisión de la radiación remanente de las supernovas, las nebulosas planetarias y las regiones H II, llamadas así porque casi todo el gas está formado por hidrógeno ionizado. Es posible establecer la aportación de las estrellas de cada región y restarla de la que se mide; así se obtiene la abundancia de los elementos que existían antes de formarse las galaxias.

Se pueden comparar las predicciones teóricas del modelo de la gran explosión, con las abundancias relativas al hidrógeno, del deuterio, del helio tres, del helio cuatro y del litio siete según lo indicaba Peimbert:

> "Se ha encontrado que todas las galaxias, con una buena determinación de abundancias, se formaron con aproximadamente el 23% de helio y el

77% de hidrógeno por unidad de masa, coincidiendo con los resultados de la teoría."[9]

A este 23% de helio se le conoce como *helio pregaláctico* o *primordial*. Si se hubiera tratado de una explosión lenta, la temperatura habría permanecido alta durante más tiempo, produciendo mayor abundancia de elementos pesados, particularmente helio. Una explosión rápida tendría una abundancia mucho menor de estos elementos. La abundancia indica el tipo de explosión y más aún, permite calcular la edad del universo. Quizás la parte más impactante del trabajo de Peimbert es que logró reproducir el valor de la constante de Hubble con este procedimiento, confirmando los resultados surgidos de la recesión galáctica.

Este trabajo, paciente y meticuloso, de casi cuatro décadas se ha convertido en uno de los pilares en que descansan los modelos que asumen la existencia de la gran explosión para explicar la estructura actual del universo observable. Así, Peimbert encontró, después de la recesión galáctica y la radiación fósil, la tercera evidencia a favor de la gran explosión. A partir de la siguiente gráfica se puede calcular la proporción de helio, que resulta del 23%.

9. Manuel Peimbert, "Evolución química del universo", en *Temas selectos de astrofísica*. UNAM, México, 1984. pp. 307-331.

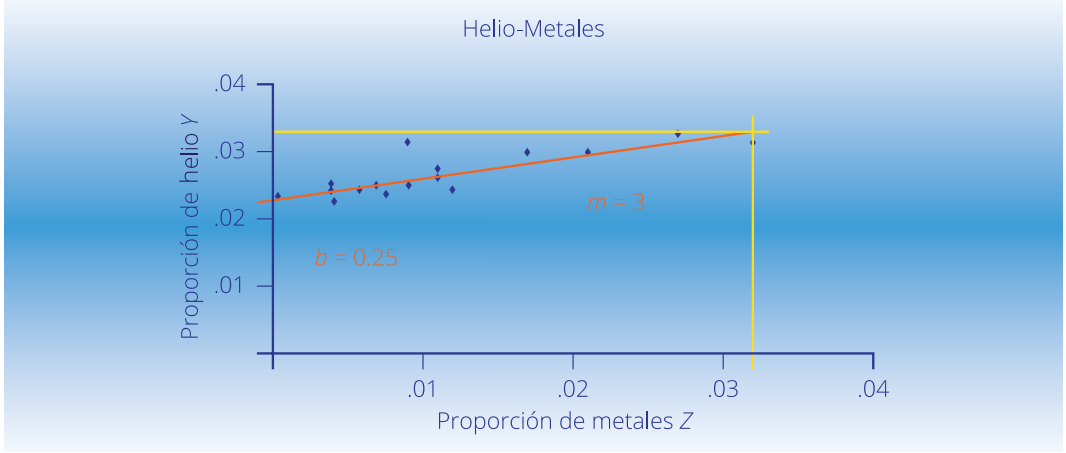


Figura 5-24. Proporción de helio vs. proporción de metales.

Características de los cuerpos cósmicos: dimensiones, tipos; radiación electromagnética que emiten, evolución de las estrellas; componentes de las galaxias, entre otras. La Vía Láctea y el Sol

A gran escala, el universo está formado por objetos de muy diverso tamaño, desde polvo galáctico hasta las agrupaciones de galaxias. Las galaxias son las estructuras más grandes en las que se organiza la materia en el universo, y están formadas por estrellas. Para clasificarlas, los científicos distinguen a una agrupación de treinta galaxias llamada Grupo Local, en la que se encuentra la Vía Láctea, y a todas las demás galaxias se les llama "exteriores".

Las galaxias presentan características muy diversas. Las más pequeñas cuentan con alrededor de 3000 millones de estrellas, mientras que las galaxias de mayor tamaño llegan a tener más de un billón de ellas. Estas últimas pueden tener un diámetro de 170000 años luz, mientras que el de las primeras no excede los 6000 años luz.

Un año luz es una unidad de distancia que equivale a la longitud que recorre la luz en un año. Más específicamente, un año luz es la distancia que recorrería la luz durante un año (a una velocidad de 299792.458 $^{km}/_{s}$). Equivale aproximadamente a 9.46×10^{12} km.

Las galaxias, además de estrellas y astros asociados (planetas, asteroides, etc.), contienen también materia interestelar, que está constituida por polvo y gas en una proporción de entre el 1 y el 10% de su masa. Se estima que el universo puede estar constituido por unos 100000 millones de galaxias, en todas ellas las estrellas están en movimiento a muy altas velocidades, del orden de cientos de $^{km}/_{s}$.

La creciente potencia de los telescopios permite observaciones cada vez más detalladas de los distintos elementos del universo y ha hecho posible una clasificación de las galaxias por su forma: galaxias elípticas, espirales, espirales barradas e irregulares.

En la Vía Láctea, una galaxia espiral barrada, se encuentra la Tierra. Posee una masa de 1012 masas solares y un diámetro medio de unos 100000 años luz. Se estima que contiene unos 200000 millones de estrellas, entre las cuales se encuentra el Sol. La distancia desde el Sol al centro de la galaxia es de alrededor de 27700 años luz. A simple vista, se observa como una estela blanquecina que se puede distinguir en las noches despejadas, aunque sus brazos espirales no se pueden apreciar. En uno de ellos, el llamado brazo de Orión, está situado nuestro sistema solar.

Sólo tres galaxias distintas a la nuestra son visibles a simple vista. La Galaxia de Andrómeda es visible desde el hemisferio norte; la Gran Nube de Magallanes, y la Pequeña Nube de Magallanes, en el hemisferio sur. Las estrellas que forman parte de la Vía Láctea dibujan a menudo en el cielo figuras reconocibles llamadas constelaciones. La Unión Astronómica Internacional reconoce 88 de ellas, algunas muy extensas, como Hidra o la Osa Mayor, y otras muy pequeñas como Flecha y Triángulo.

Las estrellas son enormes esferas de gas que brillan debido a las reacciones nucleares de gases, como el hidrógeno, que ocurren en su interior. Al agotarse el hidrógeno, se originan reacciones nucleares de elementos más pesados, que convierten la estrella en una gigante roja, que con el tiempo se vuelve inestable y lanza hacia el espacio exterior la mayor parte de su materia. Este proceso puede durar 100 millones de años hasta que la estrella se contrae por efecto de la gravedad y se hace pequeña y densa, en la forma de enana blanca. Si la estrella es varias veces más masiva que el Sol, su ciclo puede ser diferente, y en lugar de una gigante, puede convertirse en una supergigante y acabar su vida con una explosión denominada supernova dejando como remanente una estrella de neutrones. Estrellas de tamaños aún mayores pueden consumir todo su combustible

muy rápidamente y se transforman en un agujero negro. Los pulsares son estrellas de neutrones que emiten ondas de radio con periodos regulares al girar a gran velocidad. Se detectan mediante radiotelescopios. El pulsar más conocido está en la Nebulosa del Cangrejo. Su campo magnético, muy intenso, se concentra en un espacio reducido. Esto lo acelera y lo hace emitir gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética que se detecta como ondas de radio.

La palabra cuásar es un acrónimo de *Quasi Stellar Radio Source* (fuentes de radio casi estelares), son núcleos activos de galaxias jóvenes en formación. Se identificaron en la década de 1950. Más tarde se vio que mostraban un desplazamiento al rojo más grande que cualquier otro objeto conocido. La causa era el efecto Doppler, que provoca un corrimiento hacia el rojo cuando los objetos se alejan. El primer cuásar estudiado, denominado 3C 273, está a 1 500 millones de años luz de la Tierra. A partir de 1980 se han identificado miles de cuásares, algunos de los cuales se alejan de nosotros casi a la velocidad de la luz.

Los planetas son cuerpos que giran en torno a una estrella y que tienen suficiente masa como para que, debido a su fuerza de gravedad, adopten forma esférica. En el caso de cuerpos que orbitan alrededor de una estrella que no cumplan estas características, se habla de planetas enanos, o asteroides. En nuestro sistema solar hay ocho planetas, considerándose desde 2006 a Plutón como un planeta enano. A finales de 2009, fuera de nuestro sistema solar se han detectado más de 400 planetas extrasolares, pero los avances tecnológicos están permitiendo que este número crezca de manera constante.

Los satélites naturales son astros que giran alrededor de los planetas. El único satélite natural de la Tierra es la Luna, que es también el satélite más cercano al Sol. A continuación se enumeran los principales satélites de los planetas del sistema solar.

Mercurio	0 satélites	
Venus	0 satélites	
Tierra:	1 satélite →	Luna.
Marte:	2 satélites →	Fobos, Deimos.
Júpiter:	63 satélites.	
Saturno:	59 satélites.	
Urano:	15 satélites.	
Neptuno:	8 satélites.	

En aquellas zonas de la órbita de una estrella en las que no se ha producido la agrupación de la materia inicial en un único cuerpo dominante o planeta, aparecen los discos de asteroides: objetos rocosos de muy diversos tamaños que orbitan en grandes cantidades en torno a la estrella, chocando eventualmente entre sí. A consecuencia de las colisiones, algunos asteroides pueden variar sus órbitas, adoptando trayectorias excéntricas que periódicamente los acercan a la estrella. Los cometas se forman cuando la composición de estas rocas es rica en agua u

otros elementos volátiles; el acercamiento a la estrella y su consecuente aumento de temperatura origina que parte de su masa se evapore y sea arrastrada por el viento solar, creando una larga cola de material brillante. En el sistema solar hay dos grandes discos de asteroides: uno situado entre las órbitas de Marte y Júpiter, denominado el Cinturón de asteroides, y otro mucho más tenue y disperso en sus límites, aproximadamente a un año luz de distancia, denominado Nube de Oort.

Interacción de la tecnología y la ciencia en el conocimiento del universo

En nuestro universo se encuentra lo infinitamente gigantesco y lejano; las galaxias y los cuásares, así como los eventos que ocurrieron hace miles de millones de años y que dieron origen al universo, es decir, absolutamente todo lo que nos rodea.

Los seres humanos tienen una vida muy corta si se compara con la edad del universo, sin embargo, lo más grandioso del ser humano es su ingenio y su capacidad para cuestionarse y tratar de comprender todo lo que le rodea. Es capaz de diseñar y construir sofisticados instrumentos que sirven para estudiar el universo que se expande segundo a segundo, y que incluye todo lo que existe, como las estrellas, las nebulosas, los cuásares, los hoyos negros, y hasta el conjunto de todas las galaxias, incluyendo la Vía Láctea, a la cual pertenecen el Sol y muchas estrellas, además de los planetas como la Tierra, que es el lugar donde ocurren la mayoría de los fenómenos físicos que afectan al ser humano: ya sean eléctricos, magnéticos, mecánicos y meteorológicos, como los terremotos, los rayos, la lluvia, el viento, el calor, el frío, la nieve, la marea, los impactos de meteoritos, los tsunamis y las erupciones volcánicas como las del Popocatépetl. Algunos de ellos se pueden percibir con los sentidos, mientras que para estudiar otros, son necesarios instrumentos especializados, como telescopios, aceleradores de partículas, láseres, microscopios electrónicos, etcétera.

Los hombres y mujeres de ciencia tratan de comprender el origen y la evolución del universo con base en observables astronómicas, apoyándose en los conocimientos que se han obtenido mediante muchos experimentos y observaciones realizados a lo largo de la historia.

Proyectos: imaginar, diseñar y experimentar para explicar o innovar

La tecnología y la ciencia en los estilos de vida actual

¿Cuáles son las aportaciones de la ciencia al cuidado y la conservación de la salud?

En todas partes del mundo, en todos los grupos sociales, se tiene en gran valía la conservación de la salud; en particular, la salud de las personas, pero también se valora la salud de los animales y plantas del entorno.

En relación con la salud de las personas, la ciencia, desde sus diversas disciplinas, ha hecho y sigue haciendo importantes aportaciones para su cuidado y conservación. De la física, en particular, se pueden enlistar importantes aportaciones para el diagnóstico y tratamiento de diversos padecimientos y aun para el desarrollo de la investigación dirigida al mejor conocimiento y tratamiento de enfermedades. A continuación se describen, brevemente, algunas de estas aportaciones.

En el diagnóstico. Es en esta parte de la atención médica donde la física ha hecho múltiples y valiosas aportaciones: una rica diversidad de instrumentos de detección y medición que, junto con la experiencia y el buen "ojo clínico" de los médicos, han venido a facilitar y a hacer más acertados sus diagnósticos ante diversos padecimientos. Instrumentos, desde unos muy sencillos y de fácil manejo, hasta otros de una gran complejidad y cuyo manejo requiere de personal altamente especializado. A continuación, se hará referencia a algunos de estos instrumentos. Al inicio de la consulta con el médico, el paciente es sujeto a varias observaciones y mediciones como la determinación de su peso y estatura, la medición de su frecuencia cardiaca o de su temperatura corporal; mediciones realizadas con instrumentos tan sencillos como una báscula, una cinta métrica, un reloj y un termómetro, instrumentos, todos ellos, aportados por los estudiosos de la física, desde hace más de doscientos años. Otra medición indispensable en la consulta médica es la de la presión arterial, la cual se realiza con un esfigmomanómetro —también conocido como baumanómetro—, instrumento que basa su funcionamiento en la elevación de una columna de mercurio, la cual, en una escala, da la lectura correspondiente. En la determinación de la presión arterial del paciente, el personal médico se auxilia con el uso de un estetoscopio. El estetoscopio es un instrumento que se usa para escuchar ruidos en el corazón, en los pulmones o en el abdomen; detecta el ruido y lo transmite por unos tubos cilíndricos hasta los oídos del médico tratante. Los primeros estetoscopios fueron diseñados y puestos en uso por médicos en el siglo XIX, mejorados luego a partir de estudios de acústica hasta llegar a los modelos actuales. Los manómetros por su parte, son instrumentos que miden la presión que está por encima de la atmosférica y los primeros manómetros a base de mercurio fueron introducidos por los estudiosos de la física en el siglo XVII.

Hasta aquí la medición de los signos vitales del paciente. Luego, para recabar información en relación con los padecimientos específicos, el paciente puede ser

sometido a diversos estudios, entre los cuales son de destacar los electrofisiológicos y los de imagenología.

De entre los primeros, destacan el electroencefalograma (EEG) y el electrocardiograma (ECG). Éstos son estudios de los pulsos eléctricos que se manifiestan en el cerebro y en el corazón respectivamente. Las manifestaciones eléctricas son detectadas por medio de electrodos, adecuadamente colocados en la cabeza y en partes cercanas al corazón, y que transmitidos a un oscilógrafo, dan lugar a gráficas que el personal médico interpreta, conociendo así el estado actual y comportamiento fisiológico de partes del cerebro y del corazón, respectivamente; con lo cual enriquecen su diagnóstico.

Es en los estudios de imagenología, para un mejor diagnóstico de padecimientos, donde la física ha hecho importantes aportaciones. Ya desde fines del siglo XIX se cuenta con placas de imágenes de diversas partes del cuerpo obtenidas con rayos X que, como se vio antes, son ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia; luego, en el siglo pasado se introdujo y fue mejorando la obtención de imágenes de algunas partes del cuerpo humano, a partir de ultrasonidos; esto es, ondas sonoras de muy alta frecuencia; y también, en el siglo pasado, se introdujo la obtención de imágenes de partes del aparato digestivo con ayuda de un endoscopio. Es en décadas recientes cuando, con la aplicación de conocimientos de física de partículas y la interacción de éstas con campos magnéticos y radiación electromagnética, junto con el empleo de complejos sistemas electrónicos y la digitalización de la información obtenida (uso de computadoras), que se cuenta con importantes instrumentos para la obtención de imágenes de partes del cuerpo humano, con una muy alta resolución. Tal es el caso de las tomografías vía MRI (imagenología por resonancia magnética) y PET (tomografía por emisión de positrones).

En el tratamiento de pacientes. Son muchos y muy variados los instrumentos y aparatos cuyo funcionamiento se basa en principios y procesos físicos; los hay muy sencillos, como el dispositivo para la aplicación de suero a un paciente, en el que se consideran conocimientos de hidrostática; o las jeringas para la extracción de sangre y la aplicación de inyecciones, en donde se aplican conocimientos de hidrodinámica; o las pinzas, tijeras y bisturíes empleados en las cirugías, en donde se usan principios de máquinas simples. Otros, que incluyen un motor, como las fresas o los extractores de saliva empleados por los odontólogos; y, finalmente, algunos instrumentos cuyo funcionamiento se basa en conocimientos de física moderna y contemporánea, como el bisturí láser, empleado en la atención de padecimientos oftalmológicos, o los aceleradores de partículas, empleados en las sesiones de radioterapia, en los tratamientos cancerológicos.

En la investigación. Para ampliar los conocimientos que favorecen un mejor cuidado y conservación de la salud, además de los conocimientos básicos de física médica que contribuyen a la comprensión de algunos procesos fisiológicos (como el funcionamiento del sistema cardiovascular, por ejemplo), la física ha dado las bases para el diseño y desarrollo de instrumentos como los microscopios ópticos, los microscopios electrónicos, las centrifugadoras, los sistemas de refrigeración, entre otros; todos ellos de gran utilidad en los trabajos de investigación médica.

¿Cómo funcionan las telecomunicaciones?

La comunicación a distancia ha sido, desde tiempos remotos, una necesidad para las personas. Hasta hace siglo y medio ésta se lograba a través de señales sonoras, empleando tambores, campanas o cañones; u ópticas, agitando un paño, elevando humo desde parajes elevados, o mediante faros.

En la primera mitad del siglo XIX los franceses A. M. Ampere y D. F. Arago y, de manera independiente, el estadounidense Joseph Henry, inventaron el electroimán, parte esencial del telégrafo desarrollado por el estadounidense S. Morse en 1837, junto con el código que lleva su apellido y que consiste en una clave, basada en la duración de pulsos eléctricos, para cada letra del alfabeto. Los primeros sistemas de comunicación telegráfica usaron como fuente de voltaje una pila, en particular la pila de dos líquidos creada por el francés Antoine C. Becquerel en 1829. A fines de la década de los años cincuenta del siglo XIX, el uso del telégrafo en las telecomunicaciones empezó a generalizarse en todo el mundo. Luego, a finales de la década de los años setenta de ese siglo el estadounidense Alexander G. Bell inventa el teléfono, combinando también efectos eléctricos y magnéticos. Así, en el último cuarto del siglo XIX, se contaba ya con estos dos sistemas de telecomunicación, el telégrafo y el teléfono, en los cuales podían encontrarse tres elementos esenciales: el aparato emisor, el aparato receptor y los cables conductores de la señal. En la telecomunicación telegráfica el mensaje a enviar era codificado por el operador mediante pulsos eléctricos en el aparato emisor, y esos pulsos eran traducidos por otra persona al lenguaje hablado, en el aparato receptor, con base en el código Morse. A diferencia de lo anterior, en la telecomunicación telefónica, el mensaje se envía y recibe directamente en el lenguaje hablado. Luego, a fines de ese siglo XIX el italiano Guglielmo Marconi participa en la invención de la radiotelefonía y la radiotelegrafía, esto es, la telecomunicación por medio de ondas de radio, que son ondas electromagnéticas. A partir del aporte de Marconi empieza a desarrollarse la telecomunicación inalámbrica, cuyos elementos esenciales eran: el aparato emisor, el aparato receptor y las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia. En este sistema de telecomunicación, los aparatos emisor y receptor están integrados por circuitos eléctricos y electrónicos. El aparato emisor envía las ondas electromagnéticas que llevan integrada la señal, ya sea telegráfica o telefónica. La amplitud o la frecuencia de las ondas electromagnéticas portadoras es modulada por las señales telegráficas o por la palabra hablada y al llegar a su destino, el aparato receptor separa las señales telegráficas o telefónicas para escribir el telegrama o para escuchar el mensaje hablado.

Ya en el siglo XX, las telecomunicaciones tuvieron un enorme crecimiento y desarrollo, al extenderse a prácticamente todo el planeta y al mejorar su rapidez y eficacia, todo ello, al contar con centrales eléctricas de corriente alterna, y al mejorarse los sistemas de emisión, retransmisión y recepción de ondas electromagnéticas de muy variadas frecuencias y, sobre todo, al introducir el proceso de digitalización de señales mediante los circuitos electrónicos, con lo cual se introduce a este sistema de telecomunicación el uso de sistemas computacionales. Se cuenta así con la telefonía móvil que, con sus múltiples estaciones retransmisoras, es de uso cotidiano en prácticamente todo el mundo, en particular, si se

considera que se cuenta con satélites artificiales en órbita, como parte importante de los sistemas de telecomunicación. Satélites artificiales que facilitan, vía telefonía fija y vía telefonía móvil, la comunicación intercontinental; y, por supuesto, dentro de los avances en las telecomunicaciones, en décadas recientes, está la comunicación vía internet, que facilita el intercambio de información escrita, hablada e inclusive con imágenes en tiempo real de los interlocutores; esto, con el uso de computadoras personales y dispositivos portátiles como los teléfonos inteligentes. En estos sistemas de telecomunicación el aparato emisor envía el mensaje (datos, palabras, voz, imagen) mediante ondas electromagnéticas, que viajan por cable, en el aire, o aun en el vacío —si viajan hasta un satélite retransmisor— lo transportan integrado en ellas y al llegar a su destino el aparato receptor decodifica y reproduce el mensaje (los datos, palabras, voces o imagen).

Física y ambiente

¿Cómo se puede prevenir y disminuir riesgos ante desastres naturales aplicando el conocimiento científico y tecnológico?

En nuestro planeta se presentan fenómenos naturales que afectan y modifican amplias zonas geográficas; tal es el caso de los sismos, los tsunamis, los huracanes o los tornados, por citar los ejemplos más evidentes. Fenómenos naturales como éstos, al presentarse en zonas habitadas, producen grandes y graves daños en las personas y sus bienes; esto es, provocan desastres. En el idioma español, la palabra desastre significa desgracia grande o suceso lamentable. Así pues, cuando un fenómeno natural, como alguno de los mencionados, se presenta en una zona habitada y provoca graves y cuantiosos daños a las personas y sus bienes, se dice que se produce un desastre natural.

La ciencia y la tecnología han hecho aportes importantes para conocer cada vez más acerca de cómo se generan y desarrollan muchos fenómenos naturales, incluidos los que provocan desastres naturales; de manera que, aunque no es posible controlar éstos, sí es posible, con ayuda de la ciencia y la tecnología, tomar medidas para reducir la pérdida de vidas humanas y para atenuar los daños en los bienes. A continuación se aborda el tema de algunos desastres naturales y la forma en que sus efectos dañinos pueden ser atenuados.

Los sismos o temblores de tierra son, por lo general, efecto del reacomodo de las placas tectónicas de la corteza terrestre y cuando se presentan en zonas habitadas causan grandes y graves daños dependiendo de su magnitud. Son ondas mecánicas que se presentan cuando se acumula una gran cantidad de energía en la corteza terrestre al comprimirse las placas tectónicas una contra otra, en lo que se denomina una falla geológica, haciendo que la tensión aumente y al reacomodarse estas placas, se libera una enorme cantidad de energía generando ondas de gran amplitud que viajan alejándose radialmente del punto en que se generaron (conocido como foco del sismo). El punto sobre la superficie de la Tierra justo arriba del lugar donde ocurrió la liberación de energía se denomina epicentro. Durante un sismo se presentan primero ondas longitudinales, llama-

das primarias y posteriormente ondas transversales, llamadas secundarias. Éstas son las que generan oscilaciones durante el movimiento sísmico y son las que producen la mayor parte de los daños. La magnitud del sismo en la escala de Richter se determina tomando en cuenta la amplitud de las ondas secundarias y la diferencia entre el tiempo de llegada de las ondas primarias y secundarias por medio de una expresión logarítmica base 10. Esto último implica que la magnitud de un sismo aumenta diez veces de un grado al siguiente. Por ejemplo, un sismo de grado 5 es diez veces más intenso que un sismo de grado 4; un sismo de grado 8 será diez mil veces más intenso que uno de grado 4. Los sismos de grado 8 en adelante se denominan terremotos.

La mayoría de los sismos que ocurren en México tienen su epicentro en las costas de Oaxaca y Guerrero. Tardan varias decenas de segundos en llegar a la capital del país, por lo que, si en el momento de ocurrir un sismo se envía una señal con ondas de radio hacia la capital, los ciudadanos de ésta cuentan con algunos segundos para ponerse a salvo, ya que las ondas de radio, como todas las ondas electromagnéticas, viajan a la velocidad de la luz, en tanto que las ondas sísmicas, ondas mecánicas, viajan por la corteza terrestre a una velocidad de 4 o 5 kilómetros por segundo. De esta manera, las telecomunicaciones contribuyen a salvar vidas humanas. Por otra parte, en ciudades ubicadas en zonas sísmicas del país, como la Ciudad de México, se toman medidas de seguridad en la construcción de diversos edificios, puentes y vialidades.

Si el epicentro de un terremoto está en el mar se produce un tsunami. La onda que se genera desplazará una gran cantidad de agua, formando una enorme ola, que puede pasar de los diez metros de altura y tener varios kilómetros de largo, que se desplaza sobre la superficie del mar (un tsunami) y puede arrasar ciudades costeras. Así lo hizo el tsunami de 2004 originado en Sumatra, cuyo saldo fue de casi 300 mil víctimas en Indonesia, Tailandia, Bangladesh, India, Sri Lanka, las Maldivas e incluso Somalia, al este de África; y algo semejante hizo el tsunami de 2011 originado en el mar, frente a la costa este de Japón, con cuantiosos daños materiales, incluidas instalaciones nucleares para generación de energía eléctrica y un gran número de vidas humanas perdidas.

Las grandes olas creadas por el terremoto con epicentro en el fondo marino, se desplazan a gran velocidad. En mar abierto, con una profundidad de entre 4 y 5 kilómetros, la velocidad del tsunami es de alrededor de 700 $^{km}/_{h}$ (la velocidad con que se desplaza un jet comercial). Al llegar a las costas, estas olas aumentan de tamaño y disminuyen su velocidad a unos 50 $^{km}/_{h}$. Es importante conocer su epicentro y la velocidad a la que se desplaza un tsunami para que con ayuda de las telecomunicaciones, se informe a las ciudades costeras de países cercanos sobre el probable tiempo de llegada del tsunami y se tomen las medidas de precaución pertinentes. Los huracanes, también conocidos como ciclones, en nuestro país y como tifones en el Lejano Oriente, son fenómenos meteorológicos que, generalmente, se presentan durante el verano. Se caracterizan por presentar precipitaciones copiosas, acompañadas de viento de alta velocidad, que provocan inundaciones, pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales. Los huracanes han sido ampliamente estudiados por los científicos y su trayectoria,

intensidad y otros parámetros físicos son observados con la ayuda de satélites, que envían a las estaciones en Tierra imágenes y datos que muestran la posición en tiempo real de cada huracán, así como un cálculo de su probable trayectoria, en función de sus parámetros actuales. Con la información satelital, que está a disposición de todo público a través de internet, se puede conocer la posición de un huracán en tiempo real, la probable trayectoria que seguirá, las poblaciones por las que podrá pasar y así tomar las medidas de precaución correspondientes.

Los tornados son fenómenos meteorológicos de corrientes de aire ascendiendo en espiral y, simultáneamente, desplazándose sobre el suelo. Involucran una gran cantidad de energía que destroza casas, levanta vehículos e incluso ganado. La pérdida de vidas humanas por estos fenómenos meteorológicos es poco frecuente. Los tornados se presentan con cierta frecuencia en los territorios centrales de los Estados Unidos, y también, aunque con menos frecuencia, en otros países. A los tornados también se les ha estudiado ampliamente, tanto con información satelital, como con información en posición cercana al fenómeno. Con ayuda de sistemas de radar portátiles se estudia la dirección y velocidad con que se desplaza. Se estudian también su tamaño y trayectoria. En este caso, también las telecomunicaciones son factor determinante para avisar y prevenir a las poblaciones en la probable ruta del tornado, para que los habitantes tomen las medidas de seguridad correspondientes.

El calentamiento global es un incremento en la temperatura media de la atmósfera cerca de la superficie terrestre y en la tropósfera, lo que puede contribuir a cambios en los climas del planeta. El cambio climático del planeta puede verse reflejado en cambios en la temperatura, las precipitaciones o el viento, durante un periodo de décadas. Puede ser resultado de actividades humanas que cambian las condiciones de la atmósfera (como el incremento del CO_2 en ella) o de la superficie terrestre (como la deforestación o la desertificación de suelos).

Usualmente, al referirse al "calentamiento global", se alude al calentamiento como resultado de un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera (principalmente CO_2), por actividades humanas, concretamente, por la obtención de energía a partir de la quema de combustibles fósiles como el petróleo y sus derivados. Concretamente, el CO_2 en la atmósfera subió de 278 partes por millón en la era preindustrial (siglo XVIII) a casi 400 partes por millón en la actualidad. Pero el incremento más espectacular ha sido de los años cincuenta del siglo pasado a la fecha.

Como evidencias de este calentamiento global se tiene que: once de los últimos doce años han sido los más calurosos desde 1850. La temperatura global promedio aumentó 0.74 °C durante el siglo XX. Se ha incrementado el derretimiento de hielos y glaciares en todo el mundo; se detecta ya un aumento en el nivel del mar en algunos puntos del planeta.

Este calentamiento global ha traído como consecuencia cambios en el patrón y cantidad de precipitaciones en diversas partes del planeta, así como una expansión de los desiertos, sequías y ondas de calor. También la variación en el rendimiento de las cosechas de productos del campo y la extinción de algunas especies animales (como el oso polar) y vegetales son consecuencia de ello.

Ante esta problemática, por medio de las telecomunicaciones se hace circular la información de lo que está ocurriendo en el planeta, para que todas las personas contribuyan a detener el calentamiento global y demás factores que determinan el cambio climático, a fin de que la Tierra no sufra daños irreversibles. Los científicos y tecnólogos habrán de aportar conocimientos y desarrollos tecnológicos en relación con fuentes de energía renovables y no contaminantes.

¿Crisis de energéticos? ¿Qué se puede hacer para contribuir al cuidado del ambiente?

Ahorro de gas

El gas se puede ahorrar de varias maneras al cocinar; son cada vez menos las estufas de gas que utilizan "*piloto*"; se estima que cerca del 10% del gas para cocinar se ahorra apagando esa pequeña flama. Pero este gasto inútil subsiste en los calentadores de gas, que calientan agua, a menos que se adquiera la costumbre de apagar el piloto, o sustituir el calentador de gas por uno solar.

La cocción de alimentos que consume más gas es cuando los alimentos se cuecen en agua hirviendo. La preparación de frijoles "de la olla" es sin duda la que toma mayor tiempo y consumo de gas. Una opción de ahorro consiste en el empleo de una olla de presión. En este caso el ahorro se puede calcular aproximadamente si se toma en cuenta que los frijoles se cuecen en olla abierta en un lapso de 2.5 a 3 horas, mientras que en una olla a presión el tiempo de cocinado es sólo de entre 30 y 40 minutos.

Supóngase los valores de tiempo de cocción de 2.5 horas y 30 minutos para la olla abierta y la olla cerrada, respectivamente. El porcentaje del ahorro de gas se calcula como sigue.

Sea R la rapidez con que se quema el gas, es decir, R ($g/_{min}$). Su valor típico es de unos cuantos gramos de gas por minuto.

El gas quemado en 2.5 horas a olla abierta es:

$$G_1 = 2.5 \times 60 \text{ min} \times R\frac{\text{g}}{\text{min}} = 150 \text{ min} \times R\frac{\text{g}}{\text{min}} = 150 \times R \text{ g}$$

El gas quemado en la olla a presión vale:

$$G_2 = 30 \text{ min} \times R\frac{\text{g}}{\text{min}} = 30 \times R \text{ g}$$

Así que el ahorro de gas es:

$$\Delta G = G_1 - G_2 = (150 - 30) \times R \text{ g} = 120 \times R \text{ g}$$

La cantidad exacta de ahorro en gramos no se puede saber, a menos que se conozca la rapidez de quemado, R. Pero se puede calcular el porcentaje de ahorro:

$$\frac{\Delta G}{G_1}\times 100\% = \frac{120\times R\times g}{150\times R\times g}\times 100\% = 80\%$$

Hay que recordar que el porcentaje se calcula mediante la siguiente regla de tres:

$$\frac{\Delta G}{G_1} = \frac{X}{100}$$

siendo X el porcentaje desconocido.

El ahorro es aún mayor porque la rapidez de quemado de una olla a otra difiere: es menor en la olla a presión que en la ordinaria, o sea, $R_2 < R_1$. Como antes, el subíndice 1 se refiere a la olla abierta y el 2 a la cerrada.

Pero hay otras formas para ahorrar todavía más gas. Para esto, es necesario mostrar las interacciones energéticas por calor entre la flama de la estufa, la olla y el aire de la cocina. En la figura, q' es la energía que por calor libera la flama, q representa el calor que efectivamente energiza el agua de la olla. Los calores q'' y q'_{evap} se refieren a las pérdidas laterales y a la ebullición, respectivamente.

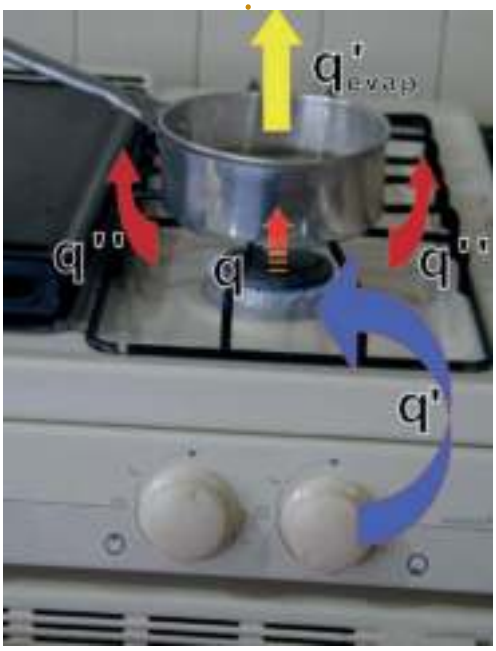


Figura 5-25. Esquema de procesamiento de calores por unidad de masa.

En una estufa bien diseñada se maximiza q, el efecto útil, para un valor dado de la energía invertida, q'. Una medida cuantitativa del buen diseño de una estufa se obtiene del cociente de las dos cantidades anteriores, que se denomina *eficiencia térmica* y se denota por la letra e:

$$e = \frac{q}{q'}$$

Expresada en forma porcentual, es:

$$e = \frac{q}{q'}\times 100\%$$

Aunque varias de las características físicas del quemado son desconocidas, pero pueden medirse, se pueden ofrecer recomendaciones para el ahorro del gas en la cocción de alimentos por ebullición de agua:

a) Sustituir la olla abierta por una olla de presión. En este tipo de olla q'_{evap}/s, o potencia de evaporación, es casi cero, por lo que el ahorro de gas es grande.

b) Aumentar la eficiencia e de la estufa por ajuste de la rapidez de quemado, o por modificación de las características geométricas del quemador (cerrar más el quemado, a modo de disminuir el escape de energía lateral).

Calentamiento de agua para aseo personal y limpieza. Calentador solar

Este uso es responsable de hasta un 80% del consumo de gas doméstico. El proceso de quemado del gas es parecido al de la ebullición del agua en la cocción de

algunos alimentos, excepto porque el proceso ocurre en el calentador de gas y la cantidad de agua es mucho mayor. En realidad, el agua que se calienta, además de emplearse en la regadera, también se utiliza en el lavado de trastes y ropa.

El calentamiento de agua para estos usos es grande, pero el calentador solar puede sustituir ventajosamente al calentador de gas.

- Características económicas del calentador solar: alto costo relativo de inversión (pero con tendencia a la baja, al aumentar el número de usuarios); nulo costo del "energético" empleado.
- Características económicas del calentador de gas: bajo costo relativo de inversión; alto costo del "energético" empleado (con tendencia al alza, al disminuir las reservas).

Lo anterior quiere decir que al cabo de cierto tiempo de uso del calentador solar, su empleo permite la recuperación de la inversión inicial. Esto se puede ver con el siguiente cálculo simplificado:

Ejemplo

Supongamos el caso real de una familia de siete personas que gasta unos $4500 de gas al año (mayo de 2013), de los cuales el 80% es para calentamiento de agua:

Gasto anual por calentamiento de agua =
($4500/año) × (0.8) = $3600/año.

Las necesidades de calentamiento de agua de la familia se pueden satisfacer con un calentador solar de 200 litros, que cuesta $10000 pesos.

En 2.8 años [= $10000/($3600/año)], el dinero gastado en gas se iguala con el costo del calentador solar y su instalación, por lo que si la vida útil del calentador solar es de 15 años como afirma el fabricante, el consumidor se ahorrará en pago de gas:

(12.2 años)($3600/año) = $43920.

A esta cantidad hay que agregar el ahorro del costo de inversión del calentador de gas, que puede ser de $1000, dando un total para el ahorro de $44920. Una cantidad digna de consideración (al momento de escribir esto el salario mínimo es cercano a los $2400 mensuales). Hay que tomar también en cuenta que el precio del gas sube, simplemente por tratarse de un recurso no renovable, de manera que la ventaja económica del calentador solar es aún mayor.

Actividad

La familia considerada en el ejemplo anterior gastaba 12 cilindros de gas al año, antes de instalar un calentador solar al precio mencionado. Después de operar el calentador solar, el consumo de gas se redujo a 2 cilindros al año. Calcule, con estos datos, la proporción de gas consumido para calentar agua para el aseo personal y el lavado de ropa y la proporción de gas quemado en la cocción de alimentos. Compare lo anterior con algún otro caso que conozca.

Por otra parte, desde el punto de vista ambiental, el calentador solar no contribuye a la contaminación del aire, durante al menos quince años. Este ahorro de contaminación tampoco es despreciable, sobre todo si se toma en cuenta que la quema de gas en los hogares es la tercera fuente de contaminación atmosférica en las grandes ciudades, después del transporte y la industria.

Para entender cualitativamente el funcionamiento de un calentador solar, es necesario presentar brevemente las distintas formas en que se procesa calor.

Calentamiento de espacios habitacionales quemando gas

"Calentar un cuarto" significa aumentar la temperatura del aire del cuarto en $\Delta T = T - T_0$, siendo T una temperatura confortable (generalmente superior a 21 °C), y T_0 la temperatura inicial (la del exterior, en el peor caso). La energía del quemador de gas que se debe transferir por calor al aire del cuarto está dada por:

$$Q = C_A \Delta T \ \frac{\text{joule °C}}{\text{°C}} = C_A \Delta T \ \text{(joule)}$$

donde C_A es la capacidad térmica total de la masa m_A de aire del cuarto, o del número total de moles n_A. C_A es el producto de la cantidad n_A de moles en el aire por su capacidad térmica específica molar, C_A^*, $C_A - n_A C_A^*$.

Si el volumen del aire no cambia, entonces c_A^* es la capacidad térmica molar del aire a volumen constante. Así que,

$$Q = n_A c_A^* \Delta T$$

Es decir, cuanto más grande es la cantidad de aire, mayor es Q y, por consiguiente, mayor es la cantidad de gas que habrá que quemar para subir la temperatura del aire de T_0 a T.

Para conocer la cantidad de gas m_G que se requiere quemar, hay que tomar en cuenta que el gas tiene un *calor de combustión por kilogramo* $q_G = 55 \times 10^6$ (joule/kg). Esto quiere decir que quemar un kilogramo de gas transfiere a la atmósfera una cantidad de energía por calor de $q_G = 55 \times 10^6$ joule. Entonces,

$$Q_G = m_G(\text{kg})q_G \frac{\text{joule}}{\text{kg}} = m_G q_G \frac{\text{kg joule}}{\text{kg}} = m_G q_G \text{ joule}$$

Por conservación de energía:

$$Q = Q_G$$

o sea que:

$$Q = n_A c_A^* \Delta T = m_G q_G$$

De esta expresión se puede despejar m_G:

$$m_G = n_A c_A^* \frac{\Delta T}{q_G}$$

Solamente faltaría conocer la cantidad de los mol de aire en el cuarto, para saber la cantidad de gas que hay que quemar para subir su temperatura desde 0 °C hasta 21°C, por ejemplo. Si el aire se comporta como gas ideal, y se considera un cuarto de 3 m de altura, 4 m de ancho y 4 m de largo, su volumen será de 48 metros cúbicos (48 000 litros). Puesto que un mol de gas ideal ocupa 22.4 litros a 0°C, a la presión de 1 atmósfera, el número de mol es:

$$n_A = \frac{48\ 000 \text{ litros}}{22.4 \text{ litros/mol}} = 2.1 \times 10^3 \text{mol}$$

Entonces,

$$m_G = \frac{(2.1 \times 10^3 \text{mol})\left(20.8 \dfrac{\text{joule}}{\text{mol°C}}\right)(21\text{°C})}{55 \times 10^6 \dfrac{\text{joule}}{\text{kg}}} = 16.7 \times 10^{-3} \text{ kg} = 16.7 \text{ g}$$

Esta cantidad de gas m_G se necesita quemar inicialmente para elevar la temperatura del aire del cuarto de 0 °C a 21°C; pero si el gas deja de quemarse la temperatura tenderá a bajar nuevamente al transferir energía por calor hacia la atmósfera.

Si se supone, por ejemplo, que en una hora la temperatura T bajaría de nuevo a la temperatura T_0. Esto es, tendríamos que estar quemando una masa de gas m_G cada hora, para vivir cómodamente en nuestra habitación. Si se usa el calentador 4 horas al día, entonces la masa total de gas m_G quemada por día será:

$$m_G = 4(\text{horas}) m_G \frac{\text{kg}}{\text{hora}} = 4 \times 16.7 \times 10^{-3} \text{ kg} = 66.8 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

En un mes: $30 \times m_G = 30 \times 66.8 \times 10^{-3}$ kg = 2004×10^{-3} kg = 2 kg.

Si se calientan tres habitaciones de las mismas dimensiones que la anterior:

Gas quemado al mes = 6 kg.
Costo del gas quemado por mes = 6 kg × (costo del kilogramo de gas)
= 6 kg × 375 pesos/30 kg = 75 pesos
(aproximadamente 1 día de salario mínimo).

Esta cantidad de gas, y este dinero, es lo que se puede ahorrar al mes si se aíslan las paredes con lambrín y se utiliza ropa adecuada en el interior de la casa en vez del calentador de gas.

Consumo de leña

La leña se utiliza como combustible sobre todo en las zonas rurales, en donde habitan cerca de 27.5 millones de personas en nuestro país (año 2000). Se estima que el 89% de la población rural emplea la leña como principal combustible para la cocción de alimentos, mientras que los usuarios de leña en zonas urbanas representan el 11%. Su uso principal es para cocinar alimentos, calentamiento de agua y en menor proporción para iluminación. La elaboración de tortillas es la tarea que requiere el mayor consumo de leña, con poco más del 42%, según un estudio realizado por la Facultad de Ciencias de la UNAM, en algunas comunidades rurales. El consumo por persona es de 2 kg al día, y más del 80% de los hogares utilizan el tradicional fogón de *tres piedras*, es decir, a fuego abierto por los lados.

El quemado de leña a fuego abierto tiene inconvenientes: la eficiencia termodinámica es baja y ocasiona enfermedades respiratorias por la aspiración de los gases de la combustión. Varios estudios muestran que la contaminación dentro del hogar, debida al quemado de leña es incluso mayor que en las grandes ciudades; ocasiona mundialmente alrededor de 1.2 millones de muertes prematuras anuales, de niños menores de 5 años.

Una opción técnica alternativa al fogón de tres piedras son las estufas de lodo y arena (llamadas "lorenas", nombre compuesto por ambas palabras), como la de la figura 5-26. Al cerrar el compartimiento donde ocurre la combustión de la leña y poner el utensilio encima del fuego, evitando fugas laterales, se aumenta la cantidad de calor que energiza directamente el alimento. La chimenea adicionada, que expulsa los gases residuales a la atmósfera evita daños a la salud, y contribuye a un aumento en la eficiencia, al regular la entrada de aire al proceso de combustión. Las pruebas de campo efectuadas por un grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de la UNAM muestran que, en promedio, se ahorra el 40% de la leña, siendo posible en algunos casos ahorros de hasta el 75%. Estos ahorros significan liberación del tiempo de trabajo de recolección, así como una disminución de la desertificación.

Reducción del consumo de electricidad

Se analizarán tres usos de la electricidad: iluminación, calefacción y calentamiento de agua para el aseo personal.

Figura 5-26.
Estufa lorena.

Actualmente hay dos tipos de focos, los tradicionales y los "ahorradores", de estos últimos existen dos tipos, los fluorescentes y los de LED. Un foco ahorrador de LED de 15 W, genera tanta iluminación como uno fluorescente de 30 W y como un foco incandescente tradicional de 100 W. Aunque los focos ahorradores son más caros que los tradicionales, en corto tiempo el ahorro de electricidad compensa su costo.

Esto quiere decir que, en una hora, el foco ahorrador de LED disipa una energía de 15 W × 1 hora = 15 $^{J}/_{S}$ × 3600 s = 54000 J, mientras que el foco tradicional disipa en el mismo tiempo una energía $^{100}/_{15}$ = 6.7 veces superior, aproximadamente 360000 J. En los cálculos aritméticos anteriores se ha utilizado:

energía = potencia × tiempo de operación.

Ahora bien, en el recibo de la luz el consumo de electricidad no viene expresado en *J*, sino en *kilowatt-hora*, abreviada como kW h (recordar que k = 1000). Ésta sería la energía que un aparato de una potencia de 1000 W disipa en una hora (o cualquier combinación del producto potencia y tiempo que equivalga a 1000 W × 3600 s = 3.6 millones de J, por ejemplo 10 focos de 100 W de potencia cada uno funcionando durante una hora), es decir:

1 kWh = 10 × 100 W × 3600 s = 3.6 × 10 6 J.

Entonces, el ahorro de electricidad por sustitución de los focos tradicionales por los ahorradores de LED, en una casa donde se utilizan 6 focos, durante 4 horas al día, es:

Energía eléctrica disipada = 6 focos × potencia de cada foco × 4 horas
= 24 × potencia de cada foco × hora.
Energía diaria disipada por 6 focos tradicionales = 24 × 100 W × h = 2.4 kWh.

Energía diaria disipada por 6 focos ahorradores de LED =
24 × 15 W × h = 0.36 kWh.
Energía diaria ahorrada por 6 focos = 2.4 kWh – 0.36 kWh = 2.04 kWh.
Energía diaria ahorrada por cada foco = 0.34 kWh.
Pesos diarios ahorrados por cada foco = $1.27 pesos.

Dado que el costo del kWh, en la tarifa de alto consumo, es de $3.724 pesos (enero de 2013), el ahorro diario es de $7.6 pesos.

En un bimestre, el ahorro total de electricidad para iluminación es de: 2.04 × 60 días = 122.4 kWh. El ahorro bimestral es de $456 pesos.

Calefacción de interiores: bomba de calor vs. calentador de resistencia

En México son comunes los calentadores eléctricos de resistencia, los que convierten cada joule de electricidad en un joule de calor. Esto podría dar la falsa impresión de que por ello son muy eficientes, que operan con eficiencia del 100%; pero se trata de una falsa impresión. Por otro lado, las llamadas "bombas de calor", que son algo parecido a un refrigerador empotrado en la pared, con la parte trasera hacia dentro del cuarto, por cada joule de electricidad gastado transfieren cinco joules de energía a la habitación (el efecto de "bombeo de calor" se puede detectar al poner la mano detrás del refrigerador: ahí se sentirá caliente el aire). Son, por ello, cinco veces más eficientes que los calentadores eléctricos comunes y corrientes (figura 5-27).

Para calcular el ahorro al sustituir los calentadores eléctricos por las bombas de calor, se considera que dos calentadores de 1 000 W de potencia cada uno, se utilizan dos horas diariamente. La energía diaria disipada en el aire será:

Energía eléctrica consumida diariamente = 2 000 W × 2 h = 4 kWh.
Energía eléctrica consumida bimestralmente = 60 × 4 kWh = 240 kWh.

Costo de 4 kWh = $1.6 pesos/kWh × 4 kWh = $6.4 pesos.
Costo al bimestre = 60 × $6.4 pesos = $384 pesos.

Figura 5-27. Calentadores eléctricos.

Dado que la bomba de calor produce cinco veces más calor que el calentador eléctrico, por cada kWh de energía eléctrica consumida, se tiene que:

Energía eléctrica consumida al día por una bomba de calor = 4 kWh/5 = 0.8 kWh.
Energía eléctrica consumida al bimestre = 60 × 0.8 kWh = 48 kWh.

Energía ahorrada al día = 3.2 kWh.
Energía ahorrada en un bimestre = 60 × 3.2 kWh = 192 kWh.

Ahorro diario = 3.2 kWh × $1.6 pesos/kWh = $5.12 pesos.
Ahorro bimestral = $5.12 × 60 días = $307 pesos.

Desde luego que si la única opción existente son los calentadores eléctricos convencionales, entonces el uso tanto de ropas adecuadas como de paredes recubiertas con materiales aislantes daría un ahorro bimestral de electricidad de 307 pesos.

Calentamiento de agua para aseo personal y limpieza: calentamiento eléctrico contra calentamiento solar

Si se desconoce el gasto por calentamiento de agua con regaderas eléctricas, en el recibo de luz se puede calcular indirectamente de manera aproximada, conociendo la cantidad de agua que se utiliza y el incremento de temperatura.

Si m es la masa diaria de agua que se calienta por persona, digamos de 15 °C a 40 °C (unos 40 L); la energía empleada por calor será:

$$Q_1 = mc_p\Delta T = 40\ (\text{kg})\ 4182\ (\text{J})/(\text{kg °C})\ 25\ °\text{C} = 4182000\ \text{J} = 1.17\ \text{kWh}.$$

Para cinco personas:

$$Q_5 = 5.85\ \text{kWh}$$

En el bimestre:

$$Q_{\text{aseo bimestral}} = 60 \times 5.85\ \text{kWh} = 351\ \text{kWh}.$$

Gasto bimestral en pesos = 351 × 1.6 pesos/kWh = $562 pesos.

Esta cantidad se ahorraría al emplear la radiación solar para calentar agua.

Los ahorros calculados anteriormente, tanto en gas como en leña y electricidad, son apenas una muestra de la importancia que el análisis termodinámico tiene en ellos.

Los casos que se han analizado de ahorro de los energéticos gas, leña y electricidad en el hogar, no sólo contribuyen a aligerar los costos de manutención de una casa, sino que también disminuyen la contaminación del ambiente.

Fuentes renovables de energía

Se han analizado dos clases de medidas para ahorrar dinero y disminuir la contaminación: aumentando la eficiencia de los dispositivos técnicos y sustituyendo los energéticos.

Sin embargo, los problemas económicos y de contaminación ambiental son más amplios; van más allá del ámbito doméstico, participan de ellos otros sectores de la sociedad, como el transporte, la industria, la agricultura y la generación de electricidad, entre otros.

Se podría pensar que, con las medidas mencionadas se reduciría la contaminación notablemente, pero no es así, pues aún dependemos enormemente de la electricidad de la red, y en México, más del 65% de ella se genera en plantas *termoeléctricas* que queman combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). A nivel mundial se calcula que la electricidad y la calefacción de interiores producen el 24.6% de los gases de efecto invernadero (GEI).

La contaminación producida en los hogares casi se podría eliminar si, además de introducir dispositivos más eficientes para iluminar y calentar, se lograra que operaran con electricidad que no fuera generada en plantas termoeléctricas, sino utilizando la energía solar.

Los energéticos solares son de dos tipos: indirectos y directos. Los primeros son las caídas de agua (mediante presas hidroeléctricas), el viento (con los aerogeneradores, como en La Ventosa en el Istmo de Tehuantepec), el bagazo de caña y otros residuos agrícolas (a través de su combustión en termoeléctricas). En este caso del bagazo de caña, la contaminación neta de GEI se reduce apreciablemente, porque los gases de la combustión son recapturados de la atmósfera, en el siguiente cultivo de la planta.

La conversión directa de energía solar en electricidad se lleva a cabo mediante el *efecto fotovoltaico*, o bien concentrándola mediante espejos en una caldera; el vapor resultante mueve la turbina de un generador.

Generación de electricidad por combustibles fósiles

Una instalación generadora de electricidad (hidroeléctrica, termoeléctrica, aerogenerador, o panel de celdas fotovoltaicas, etc.) tiene como característica principal la energía que es capaz de generar, esto es, su *capacidad instalada*, que en el SIU se especifica en watts, además del tipo de energético utilizado.

La capacidad instalada de las actuales plantas generadoras convencionales de electricidad a gas, petróleo, uranio, carbón y las grandes presas es muy grande; tanto que se mide en miles de millones de watts. Mil millones de watts = 10^9 watts = 1 GW, y se lee "un giga watt". Para tener una idea del significado de 1 GW, se puede comparar con la capacidad de nuestra mayor hidroeléctrica, que es Chicoasén en el estado de Chiapas, que tiene una capacidad instalada de 1.2 GW. La capacidad de las termoeléctricas que usan derivados del petróleo puede ser de varios cientos de millones de watts (1 millón de watts = 1 MW = 0.001 GW, y se lee "un megawatt").

Por su gran capacidad y el tipo de energético empleado, estas plantas generan una gran contaminación ambiental. Casi el 25% de los gases de efecto inverna-

dero son producidos por las termoeléctricas. Las grandes hidroeléctricas, que utilizan las caídas de agua, un recurso energético proveniente del Sol, también tienen efectos enormes en el ambiente por la tierra que inundan, la población que desplazan y la producción de gases de efecto invernadero como el metano, que se produce por la vegetación que quedó debajo de las aguas.

Las cifras siguientes aportan una idea de la magnitud de la generación de electricidad. En el año 2013 la capacidad eléctrica instalada mundial era de unos 5884 GW, distribuidos de la siguiente manera: 3352.5 GW (56%) de termoeléctricas de combustibles fósiles, 1136.0 GW (19%) de hidroeléctricas, 392.1 GW (6.6%) de nucleoeléctricas y el resto 1087.5 GW (18.48%) repartido en aerogeneradores, celdas fotovoltaicas, geotérmicas, etc. Se espera que en unos cuantos años, este espectro de capacidades cambie a favor de las fuentes renovables de electricidad.

Un problema grave es que los combustibles fósiles no sólo se utilizan en la generación de electricidad, sino que también se queman en los motores de combustión interna del transporte, industria, agricultura, etc. Tan sólo el transporte es responsable del 13.5% de las emisiones de GEI, mundialmente. Pero lo interesante, y por eso constituyen una opción real, es que los energéticos solares pueden utilizarse en todos estos sectores tanto para emitir menos contaminantes a la atmósfera, como para evitar los grandes riesgos de las plantas nucleares.

Por esta razón es apropiada la transición de los energéticos agotables (petróleo, gas, carbón y uranio) a los energéticos inagotables (solares y geotérmicos).

Constituye un dato esperanzador que en el año 2010 la capacidad eléctrica mundial basada en los energéticos renovables superó, por primera vez en la historia, la capacidad eléctrica total proveniente del uranio. Pero la sustitución integral de los hidrocarburos y el carbón por los energéticos inagotables requiere de un esfuerzo mucho mayor, que quizá implique un cambio profundo en el paradigma actual de utilización de la energía.

Ciencia y tecnología en el desarrollo de la sociedad

El desarrollo de la sociedad en el siglo pasado y lo que va del presente no tiene precedentes en la historia de la humanidad. En un periodo muy corto, comparado con los años que tiene el ser humano sobre la Tierra, se modificaron considerablemente las costumbres, el comportamiento social, la educación y en general la forma de vida. El avance de la ciencia y los desarrollos tecnológicos a que dio lugar impuso cambios importantes en la dinámica del ser humano.

El cambio en nuestros hábitos alimenticios y la mejoría en los servicios de salud llevaron a duplicar el número de años de la esperanza de vida. El diseño y la generación de nuevos equipos electrónicos dio un vuelco a la cantidad y forma de acceder a la información, a la calidad y riqueza de las comunicaciones y a modificaciones en el transporte de carga y de personas a lo largo del planeta. La forma de educar a niños y jóvenes y la formación de profesionales en los diferentes ámbitos de la sociedad, han sufrido cambios muy importantes.

Estos grandes cambios se debieron a los increíbles avances tecnológicos observados en las últimas décadas como resultado de un mejor entendimiento de las leyes que gobiernan la naturaleza. Este mayor conocimiento fue posible debido a que a mediados del siglo pasado se reconoció mundialmente la importancia de apoyar a grupos de científicos en la investigación básica y a fomentar sus aplicaciones. El entendimiento detallado de las propiedades de la materia, sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas, entre otras, fue lo que dio origen a aplicaciones en la electrónica, las telecomunicaciones, la ciencia de materiales, la óptica, etcétera.

¿Qué aporta la ciencia al desarrollo de la cultura y la tecnología?

La investigación científica, básica y aplicada, es el pilar sobre el que descansan el desarrollo tecnológico y la innovación. El uso de nuevos aparatos y equipos lleva como consecuencia un cambio de hábitos y costumbres. Bastan algunos ejemplos para sustentarlo.

La electrificación a lo largo de todo el orbe ha permitido el uso cotidiano de la radio, la televisión y múltiples aparatos domésticos que hacen más simple y agradable nuestro tránsito por la vida. También ha permitido que se realicen actividades nocturnas, imposibles antes de que se desarrollaran las diferentes formas de producir energía y su transmisión a los lugares más apartados. La energía eléctrica es lo que mueve la mayoría de las industrias.

Más recientemente, el teléfono celular con todas sus innovaciones (considerado como uno de los inventos más usados por la población), ha modificado la actitud y comportamiento, principalmente de los jóvenes y empieza a introducir nuevas inquietudes entre los niños. El desarrollo de ese aparato se basó en el desarrollo de materiales con propiedades electromagnéticas especiales y al avance en los sistemas y técnicas de comunicación. Este invento propició el destierro de las cámaras fotográficas tradicionales; el proceso de revelado fotográfico basado en emulsiones de plata es ahora parte de la historia.

Otro ejemplo es la introducción de internet. Por este medio se puede acceder a una gran variedad de información, se pueden hacer compras, se pueden concretar negocios, inclusive participar en programas educativos a distancia. Su uso a nivel mundial constituye las redes sociales internacionales. La idea, el desarrollo y la programación de internet surgieron de la necesidad de comunicación entre científicos, en un centro de investigación de física básica en Ginebra, Suiza. Por otro lado, la gran cobertura actual es posible gracias al desarrollo de computadoras ultrarrápidas, con gran capacidad de almacenamiento de datos y de reducido tamaño.

Finalmente, los avances en la medicina se deben no sólo a la investigación científica en las áreas biológicas y médicas, sino también al desarrollo de equipo basado en los conocimientos sobre la interacción de las ondas sonoras y electromagnéticas con la materia orgánica. Los modernos aparatos para el diagnóstico y tratamiento de múltiples enfermedades fueron desarrollados con la participación de físicos básicos y aplicados.

¿Cómo han evolucionado la física y la tecnología en México?

La física como profesión es reciente en México. La primera carrera universitaria en física que se ofreció fue en la Universidad Nacional Autónoma de México en 1938, con sede en el Palacio de Minería. A ésta la sucedieron las ofrecidas por la Universidad Autónoma de Puebla y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. La consolidación, la aceptación y valoración social de esta carrera tomó varias décadas. Sin embargo, en la actualidad hay registradas 36 instituciones que ofrecen alguna opción en física, a lo largo de todo el país. Con el tiempo, la carrera que se ofrecía simplemente como licenciatura en Física, se diversificó como físico-matemático, físico experimental, físico electrónico, ingeniero físico, ingeniero en electrónica, entre otras.

Los grupos de investigación en física también son relativamente jóvenes. Inició también en la UNAM pero en la actualidad existen muchos grupos y centros de investigación en un número grande de universidades estatales y centros públicos de investigación. Las primeras investigaciones se centraron en escudriñar las propiedades de la radiación cósmica. Actualmente, los grupos más numerosos se dedican a investigar las propiedades de los materiales: electrónicas, ópticas y magnéticas. Otros grupos menos numerosos se dedican a la astronomía, la astrofísica, al estudio de átomos y moléculas, de partículas subatómicas, entre otros. En general las aportaciones de los físicos mexicanos son de alta calidad y han contribuido al mejor entendimiento de la naturaleza. Una asociación civil que ha promovido con éxito las diferentes actividades para el desarrollo de la física es la Sociedad Mexicana de Física, fundada en 1951.

Las aportaciones tecnológicas en nuestro país son muy pocas, aunque destacan desarrollos importantes como la televisión a color, que fue inventada por el ingeniero Guillermo González Camarena en 1942, que demuestran el talento de los mexicanos. Otros aportes tecnológicos son el fierro esponja, desarrollado por un equipo bajo la dirección del ingeniero Juan Celada Salmón; la finalidad era facilitar la producción de materia prima para la producción de acero. Este desarrollo se considera una de las tecnologías mexicanas más conocidas en el ámbito internacional.

Otra aportación en el área de la metalurgia es la síntesis de una aleación basada en Zn-Al y Cu (zinalco), con propiedades mecánicas semejantes a un acero, pero 30 por ciento más ligero y con alta resistencia a la corrosión atmosférica. Además posee excelentes propiedades superplásticas. Este desarrollo tecnológico fue realizado por el grupo del doctor Gabriel Torres Villaseñor, investigador del Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM.

¿Qué actividades profesionales se relacionan con la física? ¿Cuál es su importancia en la sociedad?

La formación de un físico incluye una gran cantidad de estudios no sólo en física, sino en matemáticas y química. Haciendo énfasis en la observación y el análisis de los fenómenos naturales, se enseña a los estudiantes a resolver problemas con base en la información existente, la medición de los parámetros involucrados en el problema y el análisis crítico de las propuestas de solución. Se ha demostrado

que el desarrollo de estas actitudes, necesarias para un científico, da como resultado ciudadanos serios, trabajadores, críticos e imaginativos.

Con esas características, las opciones de desarrollo profesional de un físico son muy amplias. Los físicos son en general buenos ingenieros en electrónica, óptica, comunicación o computación. También tienen aceptación en instituciones e industrias dedicadas a la generación y manejo de energía. Un tema más reciente que requiere de físicos es la física médica, donde la calibración, uso y mantenimiento de equipo médico es indispensable para un servicio de salud eficaz y seguro. Las capacidades analíticas de un físico han sido aceptadas en disciplinas que aparentemente son ajenas a la física, como las actividades bursátiles.