

FÍSICA

LAS INTERACCIONES ENTRE OBJETOS Y SU MOVIMIENTO

LA PERCEPCIÓN DEL MOVIMIENTO Y LA NOCIÓN DEL TIEMPO

Sin duda, el estudio del movimiento ha sido importante en todas las épocas de la humanidad y para todas las culturas. El hallazgo arqueológico de armas y herramientas de piedra se remonta a decenas, o tal vez cientos de miles de años. Se puede observar en los museos al cazador prehistórico formando grupos armados con lanzas, inteligentemente rodeando al mamut para cazarlo. Su supervivencia dependía del éxito de esa empresa.

Si se piensa en un cazador armado con su lanza, que descubriera a un venado pasando, ¿cómo debería ser su lanzamiento para cazarlo?, ¿cómo modificaría el tiro si el animal pasa corriendo frente a él? La experiencia a lo largo de los años le enseñaría cómo actuar en diferentes circunstancias.

Los antiguos cazadores observaron el movimiento de otros animales tan distintos como el mamut o las aves y emplearon diferentes técnicas e instrumentos para cazarlos. ¿Podrían cazar un pájaro con una lanza? ¿Cómo es el movimiento de un pájaro en comparación con el de un venado, o el de un mamut?

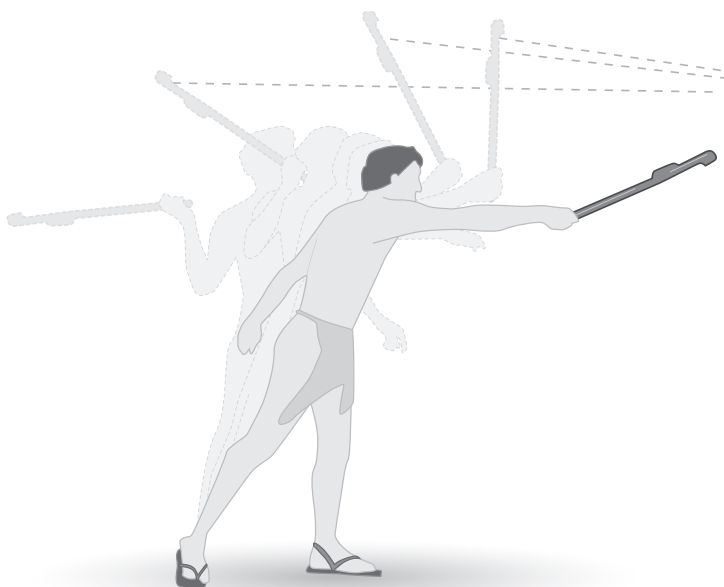
En algunas culturas los pájaros eran cazados con cerbatanas. En ocasiones, dada la rapidez de su presa, el cazador era poco preciso y sólo la hería, por lo cual idearon ponerle a los dardos veneno de acción rápida, como el curare.

Si se observa la figura 1, se puede imaginar cómo el dispositivo llamado *átlatl* fue un instrumento diseñado para garantizar un mayor éxito en la caza. Éste dependía del buen entendimiento del movimiento de los proyectiles, los animales y el cazador mismo.

El *átlatl* fue utilizado hace miles de años, en lugares tan distantes como el norte y el centro de América y en Australia. Otro instrumento —más sencillo— empleado desde la antigüedad es la honda. ¿Cómo supone que la honda mejora la eficacia del lanzamiento de piedras, comparado con el lanzamiento sólo con la mano?

¿Qué sentidos son los que están más implicados en la percepción del movimiento? ¿Cree que distinguir entre movimientos lentos y rápidos era relevante para los cazadores? ¿Puede haber alguna relación entre estos tipos de movimiento y las características de los dispositivos de lanzamiento?

Figura 1 | Esquema *átlatl*.



Otro tipo de movimiento de gran relevancia en la antigüedad fue el de los astros. El conocimiento del movimiento de los astros en el cielo, sobre todo a partir del desarrollo de la agricultura, fue de gran utilidad. Éste era necesario para determinar con exactitud las etapas del proceso agrícola; el momento de preparación del terreno, la siembra y la cosecha, los cuales se fueron fijando a lo largo del año según el movimiento de los astros, principalmente del Sol.

En las culturas prehispánicas, cuya dieta dependía básicamente del maíz, anticipar el inicio de la temporada de lluvias era vital dado que, para que la planta se desarrolle adecuadamente, es necesario sembrar la semilla antes del inicio de las lluvias.

¿Cómo se imagina que los antiguos pobladores —por ejemplo, los mayas— llegaron a saber que al cabo de unas semanas empezaría a llover?

Después de muchos años de observación pudieron asociar el movimiento del Sol con el inicio y el término de las diferentes estaciones del año y así elaboraron un calendario. Para ellos sólo había dos estaciones importantes: la época de lluvia y la de sequía.

Pero, ¿qué significa eso de “el movimiento del Sol”? El movimiento del Sol, ¿en relación con qué?

Para empezar, ¿cuántos movimientos del Sol puede distinguir el lector?

Un movimiento obvio es el diario, que empieza con el amanecer y termina en el atardecer, ¿está de acuerdo? Este movimiento seguramente regulaba las actividades cotidianas de nuestros antepasados.

El otro movimiento solar está asociado con las estaciones del año. ¿Se puede detectar éste tan fácilmente como el movimiento diario del Sol en el cielo? Dado que se trata de un movimiento que tarda meses en mostrar sus características, se deben realizar observaciones durante un año. Para mostrar con éxito ese movimiento hay que ser cuidadoso y constante en la observación (véase la actividad en la p. 12).

ACTIVIDAD

Investigue cómo construir un reloj solar casero. Construya uno. ¿Qué tan buena será la comparación entre la hora marcada por su reloj solar y la marcada por un reloj ordinario?

¿Cómo se sabe que algo se mueve?

La percepción de los fenómenos de la naturaleza que involucran cambio y movimiento

¿Por qué se dice que un automóvil se mueve? Porque el lugar del piso sobre el que se encuentra es distinto en diferentes momentos. Si se viaja en un autobús, y se asoma por la ventana, se observa que el paisaje va cambiando. Alguien parado junto al camino podrá decir que es el autobús lo que se mueve. El pasajero, podría decir que lo que se mueve es el paisaje (fig. 2).

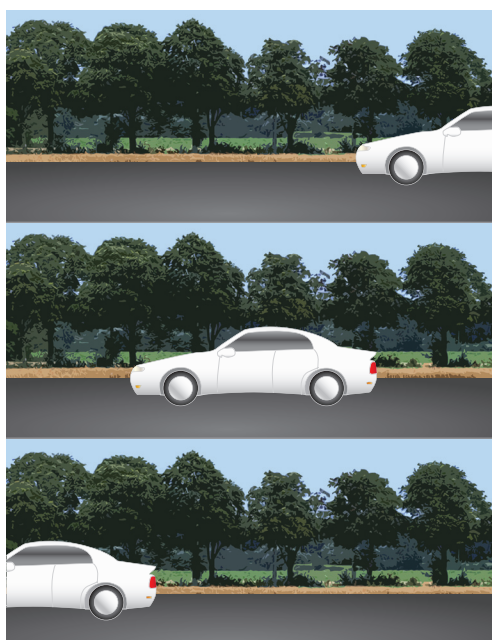


Figura 2 | Automóvil en movimiento.

ACTIVIDAD ANUAL

Ésta es una actividad que el profesor puede sugerir a sus alumnos para desarrollar en grupos de dos o más. Si su horario es matutino, puede hacerla a las 9; si es vespertino, a las 3, de preferencia el mismo día de la semana. Elija un sitio iluminado por el Sol, por ejemplo en el patio de la escuela. Marque un punto en el suelo, de manera que la marca sea permanente y no se borre en varios meses. Sobre la marca se colocará verticalmente una varilla recta de un metro, la que proyectará una sombra hacia el lado opuesto del Sol.

Sobre una cartulina dibuje una línea recta paralela a uno de sus bordes más largos, a unos 40 centímetros de él. Marque la parte central de ese borde con un plumón. Ahora, en un extremo de la línea recta dibujada escriba la palabra **NORTE** y en el extremo opuesto la palabra **SUR**.

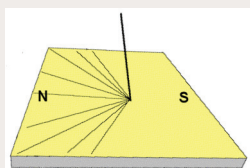


Figura 3

Consiga una brújula, que ocupará al realizar las observaciones. A la hora indicada de un día de la semana (por ejemplo, el lunes), según el turno (9 de la mañana o 3 de la tarde), un miembro del equipo sostiene verticalmente la varilla con un extremo sobre la marca del suelo, mientras otro coloca la cartulina de modo que la marca en el borde coincida con la base de la varilla y la línea recta antes dibujada coincida con la dirección norte-sur que indica la brújula.

Marque ahora el punto donde la sombra proyectada por la varilla interseca a la línea norte-sur con el número 1. A la semana siguiente repita la observación y marque con el número 2 el correspondiente punto de intersección. Y así sucesivamente cada semana. Al lado de cada número anote la fecha de observación. Una vez que se hayan completado las observaciones a lo largo del año, conteste las siguientes preguntas:

- ¿En qué fechas sucede que la sombra del Sol sobre la recta norte-sur llega más al norte, más al sur, pasa por el punto medio?
- ¿Qué nombres, desde el punto de vista astronómico, tienen estas fechas especiales?
- ¿Qué relación guardan los nombres anteriores con las estaciones del año?
- ¿En qué fechas se iniciaron las temporadas de lluvia y sequía? Marque en la recta norte-sur, los puntos de intersección correspondientes a esas fechas.
- ¿Cree que para el año siguiente el inicio de las temporadas de lluvias y secas se den en las mismas fechas que las que determinó en esta actividad?
- ¿Se le ocurre alguna otra pregunta importante, que se pueda responder con las observaciones?

Se sugiere investigar la influencia que el llamado “cambio climático” u otros fenómenos —como “El Niño”— tienen sobre las fechas de inicio y término de las temporadas de lluvia y sequía en México, así como la relación que hay entre la orientación de los edificios en las ciudades prehispánicas, y algunos sucesos astronómicos conectados con las actividades agrícolas o de otra índole.

≈ LECTURA ≈

El Equinoccio de Primavera

La Pascua católica —la fecha pastoral más importante de esta Iglesia, por acuerdo del concilio de Nicea en el siglo **IV**— se celebra el primer domingo, después de la primera luna llena, posterior al Equinoccio de Primavera. Esto es, la Semana Santa es la que incluye a la primera luna llena, después del 21 de marzo, la Pascua es el llamado Domingo de Resurrección.

La fecha más importante del año mexica era la bajada de Huitzilopochtli, su dios fundamental, en el Solsticio de Invierno. En el actual calendario —llamado gregoriano, debido a que fue adoptado por el papa Gregorio XIII a finales del siglo **XVI**—, el Solsticio de Invierno ocurre el 21 o 22 de diciembre. En el siglo **XXI** sigue siendo la fiesta más importante del calendario mexicano. Sin embargo, para los conquistadores de mediados del mismo siglo **XVI** —quienes aún usaban el calendario de Julio César, el cual iba retrasado 10 días respecto del gregoriano— tal fecha cayó el 12 de diciembre.

≈ LECTURA ≈

Duración del día y el porqué del Horario de Verano

Las horas de salida y puesta del Sol cambian con las estaciones del año mediante el siguiente procedimiento: desde un mismo lugar, donde se puedan observar los puntos oriente y poniente del horizonte, cada día (o al menos un día fijo de la semana), vaya al punto de observación antes de la salida del Sol y espere el primer rayo de luz, anotando la fecha, hora y minuto del amanecer. Regrese al atardecer para repetir el procedimiento, esperando el momento preciso en que el Sol desaparece en el horizonte; anote la hora y minuto. Recabe estos datos durante un año.

Para calcular la duración de cada día, a la hora de la puesta del Sol se le resta la de salida. Se puede ver, por ejemplo, que el día más largo del año en el Distrito Federal dura 13 horas y 19 minutos, y corresponde al Solsticio de Verano —más o menos el 21 junio—; y que el más corto, que dura 10 horas y 57 minutos, corresponde al Solsticio de Invierno y es alrededor del 20 de diciembre.

Con una segunda resta se puede ver que la diferencia entre el día más corto y el más largo es de 2 horas con 22 minutos. Si durante el verano, cuando los días duran más, uno se levanta a la misma hora, se desperdicia una hora de luz natural. Por lo anterior, se acordó adoptar el llamado Horario de Verano, que consiste en adelantar los relojes una hora en esa temporada.

Otro ejemplo sería la observación de la constelación de Orión durante los meses de diciembre y enero, siempre a la misma hora. Se puede ver que, conforme pasan los meses, este paisaje celeste va cambiando hasta ser completamente diferente medio año después [fig. 4].

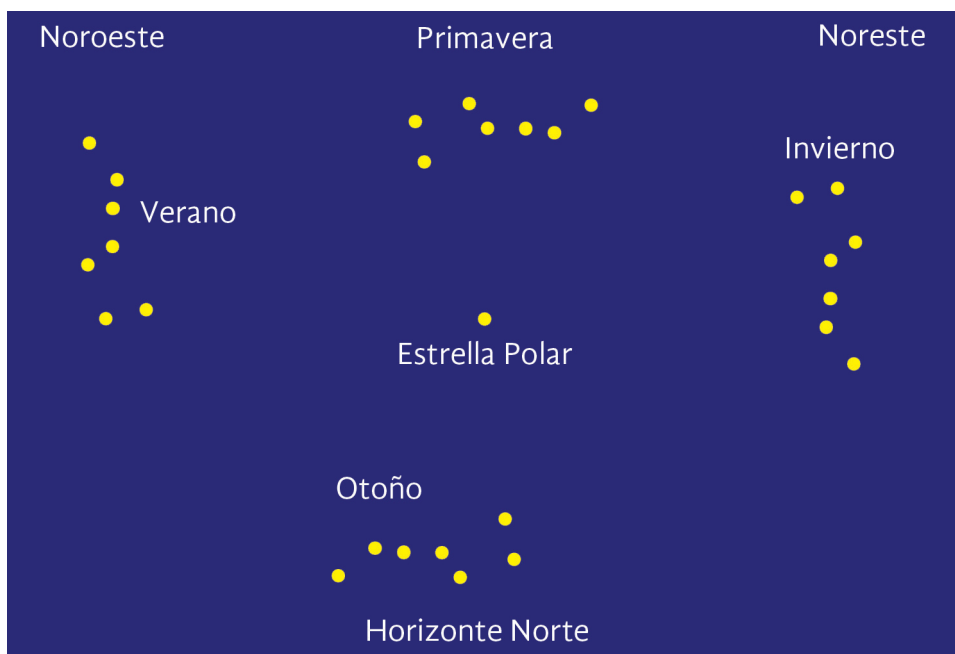


Figura 4 | Orión en las estaciones del año.

En cada caso se dice que algo se mueve porque ha cambiado su posición, medida como una distancia o un ángulo respecto a (o relativo a) un objeto que se toma como referencia, un punto que puede ser el pico de una montaña, una marca sobre el piso, el horizonte, etcétera.

Para profundizar en el concepto de la relatividad del movimiento se puede realizar la actividad siguiente:


ACTIVIDAD

 Responda las siguientes preguntas:

- Imagine que está parado junto a un ciclista y que empiezan a correr simultáneamente, ¿en cuánto tiempo cree que el ciclista lo dejará atrás?
- Si ahora el ciclista pasa frente a usted, estando parado, y luego corre, lo alcanza y siguen moviéndose juntos, ¿qué diría del movimiento del ciclista con respecto a usted?
- Si al estarse moviendo a la par con el ciclista, pasa junto a un amigo que está parado en el camino, según usted, ¿su amigo está en reposo o está en movimiento?
- Al caminar en la calle, ¿cómo se da cuenta de que una persona que camina en el mismo sentido que usted va más de prisa o más lento?
- Si una persona lo rebasa en la calle, ¿qué hace usted para alcanzarla y rebasarla?

El papel de los sentidos en la percepción de movimientos rápidos o lentos

ACTIVIDAD


 Observe los objetos que se mueven en su entorno y clasifique sus movimientos en una tabla como la siguiente, marcando con una cruz el tipo de movimiento. Incluya al menos diez objetos.

Objeto	Movimiento lento	Movimiento rápido

¿Qué criterio usó para distinguir entre los dos tipos de movimiento?

Realice la siguiente actividad para notar el movimiento de objetos que no pueden verse ni oírse.

ACTIVIDAD

 Coloque sobre la mesa un frasco de perfume, una loción, un ramo de flores, o incluso un jabón de tocador. Quite la tapa o envoltura, según sea el caso, y espere unos segundos; percibirá el aroma. ¿Cómo es que le llega el aroma? El proceso es relativamente común, pero es prácticamente invisible e inaudible.

Otro tipo de movimiento, que se puede ver pero no oír, es el que se observa al poner un poco de café soluble o una gota de tinta en un vaso con agua.

El aroma le llega porque las partículas del perfume se mueven entre las del aire, aun si no las ve. Entonces, si se quiere seguir la propagación del aroma, esto es, el lento movimiento del perfume, debe usar el olfato. No es extraño encontrar personas que usan su olfato para localizar la fuente de un olor, sobre todo si es agradable, sabiendo que será más intenso conforme se acerquen a su origen.

Al proceso mediante el cual las partículas de una sustancia se mueven entre las de algún medio, como agua o aire, dispersándose, se le llama *difusión* y fue explicado de manera brillante por Albert Einstein en 1905, asumiendo que los átomos que constituyen el medio golpean sin cesar a las partículas, obligándolas a moverse.

La tinta o el café (el petróleo derramado en el mar tiene un movimiento similar) se mueven azarosamente en el líquido, impulsadas por el incesante aunque invisible movimiento microscópico de las partículas del agua (en el caso del petróleo la dispersión es más rápida por las corrientes marinas).

A este tipo de fenómenos se les llama procesos irreversibles, ya que es imposible regresar a la situación inicial espontáneamente. En un proceso reversible —como el rebote de una pelota de goma o un péndulo— se regresa a la situación inicial naturalmente.

El movimiento no sólo se puede ver y oler, sino también escuchar; por ejemplo, el movimiento de un auto por el ruido del motor, la caída de un objeto por el ruido del golpe con el piso. Por la forma con la que cambia el volumen del ruido del motor, un invidente junto a una avenida o autopista sabría si el auto se acerca o se aleja.

Pero, ¿cómo es que se produce el sonido?

En todos los fenómenos en que se manifiesta el sonido, debe haber algo que lo produzca. El repique de campanas y el rasgar las cuerdas de una guitarra dejan ver el origen del sonido. Tanto al rasgar la cuerda de una guitarra como al golpear con el badajo el cuerpo de una campana se genera un movimiento vibratorio que produce el sonido que percibimos.

Se concluye que cuerpos vibrando producen perturbaciones en el aire. Ahora se puede preguntar, ¿cómo es que se perciben estas vibraciones generadas como sonido?

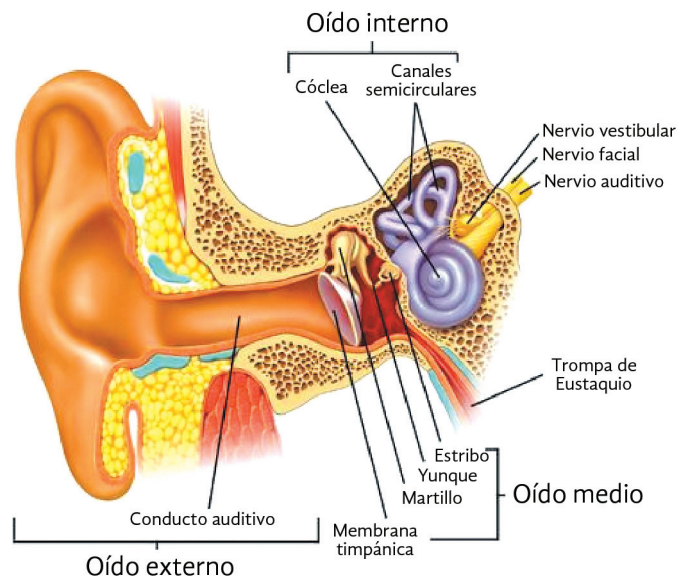
La percepción de los sonidos

La perturbación del medio que se propaga como sonido llega al oído, hace vibrar al tímpano y el cerebro lo interpreta. En la figura se muestra un esquema de los órganos 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.

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 os-

Figura 5 | Esquema del sentido del oído.



cilatorio 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.

Medición de la intensidad del sonido

Los oídos son muy sensibles a los sonidos. Mientras mayor sea la potencia de la fuente sonora, mayor será la intensidad del sonido emitido, lo que produce mayores vibraciones en el tímpano, por lo que los 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.

<i>Nivel de sensación sonora (dB)</i>	<i>Sonido</i>
0	No se aprecia
10	Movimiento de hojas
30	Tic tac 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 anotar 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.

Propagación del sonido en diferentes medios

Las ondas sonoras perturban al medio que la rodea; este medio puede ser, además de un gas como el aire, un líquido o un sólido. El sonido no se podría propagar en ausencia de un medio transmisor. El físico y químico inglés Robert Boyle (1627-1691) diseñó un experimento que hoy se puede hacer con una bomba de vacío, que no difiere mucho de una aspiradora casera. Se pone una fuente de sonido —como un radio o un despertador— en un frasco transparente (como los de café); después de cerrar herméticamente el frasco,

se le extrae el aire mientras la fuente de sonido continúa trabajando. Se nota que el sonido disminuye conforme se extrae el aire, y que regresa al entrar el aire al frasco.

Con este experimento se comprueba que el sonido es el resultado de una perturbación que necesita de un medio para desplazarse, el aire en este caso.

Entonces, la perturbación en el aire es un movimiento que se puede detectar como sonido. Así, el oído y los instrumentos que se han desarrollado para ampliar sus facultades (micrófonos y audífonos junto con los amplificadores) son detectores de este tipo de movimiento.

Hasta ahora se ha visto que el movimiento no sólo se huele o se escucha o se ve; también se puede percibir por medio del sentido del tacto. Se siente el movimiento del aire, el agua y la tierra. El viento es aire en movimiento, se percibe en el rostro y el resto del cuerpo. También se puede percibir el vaivén del agua en una alberca. 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 nuestra ciudad son los terremotos que han causado tanta devastación (fig. 6).

Éstas 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, formando lo que se denomina falla geológica, haciendo que la tensión aumente, y al acomodarse 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*). El punto sobre la superficie de la Tierra justo arriba del lugar donde ocurrió la liberación de energía se denomina *epicentro*. 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 viajan a la velocidad de la luz.

Si el epicentro del terremoto está en el mar, la onda que se genera desplazará una gran cantidad de agua, formando una enorme ola de más de diez metros de altura y varios kilómetros de largo que puede arrasarse ciudades costeras, como lo hizo el tsunami de 2004 originado en Sumatra. El saldo fue de casi 300 mil víctimas en Indonesia, Tailandia, Bangladesh, India, Sri Lanka, las Maldivas e incluso Somalia, al este de África. Al llegar a las costas, estas olas 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 en peligro (fig. 7, p. 32).

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 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.

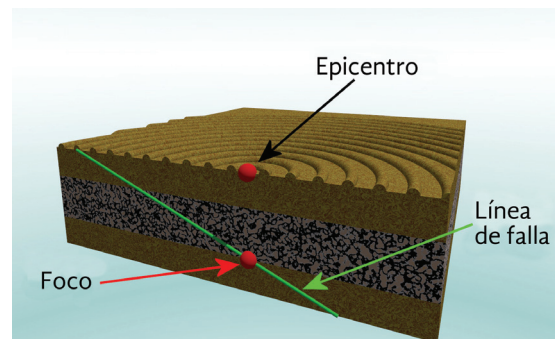


Figura 6 | Esquema ondulatorio de un terremoto.



Figura 7 | Tsunami.

El movimiento se ve, se escucha, se siente y hasta se huele. Se sabe del movimiento por los sentidos, y cuando éstos —obviamente limitados— han sido insuficientes, se amplían con aparatos cada vez más sofisticados, de mayor alcance, rapidez y precisión, cuyos resultados, finalmente, deberán llegar a nuestros sentidos.

Ahora, ¿se podría seguir el movimiento de una pequeña piedra disparada con una resortera, o el recorrido de una flecha a partir de ser lanzada por un arquero, o el movimiento de una bala a partir de que sale disparada de un arma de fuego?

En algunos casos se puede seguir el recorrido de algunos cuerpos que se mueven tan rápido como una bala; por ejemplo, los aviones supersónicos pueden volar con esa ra-



Figura 8 | Movimiento ultrarrápido.

pidez y se pueden ver a lo lejos, pero hay que tener presente el tamaño del cuerpo y lo lejos que está del observador.

En el caso del movimiento de cuerpos cercanos al observador, no es posible, por ejemplo, seguir el recorrido de una bala, ni contar el número de aleteos por minuto del vuelo de una abeja o el de un colibrí. Lo que se percibe son los sonidos característicos de esos aleteos, producidos por movimientos muy rápidos que no se pueden ver con claridad.

Hay en la naturaleza movimientos más lentos que, por ejemplo, el avance de un caracol; algunos puntos de la ciudad de México —como la Catedral Metropolitana o el Palacio de Bellas Artes— se han venido hundiendo a razón de algunos centímetros por año. Otro ejemplo de movimiento muy lento es el de las placas tectónicas —trozos de la corteza terrestre—, por cuya causa el continente americano se está alejando de las costas de Europa y de África 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, apoyado en algunos dispositivos técnicos que han sido diseñados y desarrollados con base en los avances del conocimiento científico.



Figura 9

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!

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.

La noción del tiempo

Muchas veces se dicen frases como:

- La película fue tan aburrida que *se nos hizo* muy larga.
- Nos la pasamos tan bien en la fiesta, que *se nos hizo* muy corta.

Las frases “se nos hizo muy larga” o “se nos hizo muy corta” califican la duración de los eventos al no tener más referencia que nuestro sentir. Pero en realidad, las películas o las fiestas duran lo mismo, nos divirtamos o no. Es por eso que, para tener una medida confiable del tiempo, no basta con nuestra percepción, sino que se requiere de un instrumento que lo mida objetivamente; es decir, un reloj.

Quizá sea muy obvia la percepción del transcurso del tiempo por el paso del día a la noche; de hecho, desde tiempos inmemoriales la humanidad ha sabido que el cambio

Figura 10 | Reloj de Sol y reloj actual.



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 fue encontrado en Egipto. El día se dividió en 12 partes, es decir, en 12 “horas”.

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

Otra opción que tuvieron los científicos, antes de la aparición de los relojes actuales, fue la de 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”.

Figura 11 | Relojes de agua y de arena.



Figura 12 | Reloj de péndulo.

ACTIVIDAD

Construir un reloj de agua y uno de péndulo

Para hacer el reloj de agua consiga una botella de plástico de dos litros con tapa, como las de refresco. Córtela la base con unas tijeras, y hágale un hoyo en el tapón más o menos de $\frac{1}{4}$ de pulgada, como se muestra en la figura. Ahora pegue a la botella una cinta adhesiva en la cual dibujará líneas separadas cada centímetro. Llene la botella de agua hasta la primera línea, cubriendo el hoyo del tapón.



Figura 13 | 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. 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?

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?

Descripción del movimiento de los objetos

- *Experiencias relacionadas con el movimiento en fenómenos cotidianos*
- *La descripción y medición del movimiento: marco de referencia y trayectoria; unidades y medidas de longitud y tiempo*
- *Relación desplazamiento-tiempo; conceptos de velocidad y rapidez*
- *Representación gráfica posición-tiempo*

Se habrá dado cuenta de que para describir el movimiento es necesario tener un punto de referencia, como en los siguientes ejemplos:

Imagine a una persona en el Polo Norte que saca un letrero que dice “arriba”. Una segunda persona en el Polo Sur saca otro letrero que dice lo mismo: “arriba”. Vistos de cerca e individualmente, parece correcto lo que están haciendo. Observados de lejos, como en la figura, las cosas cambian mucho, pues lo que arriba es para uno, para el otro es abajo. Además, si se gira este libro noventa grados, los dos quedarían acostados con su letrero. Se debe reflexionar: ¿Qué quiere decir estar arriba o abajo?



Figura 14

ACTIVIDAD

👉 Plantee al grupo la siguiente situación:

En una competencia de reflejos hay 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 al concursante que debe golpearla con un martillo en el momento de recibir la señal luminosa. Los concursantes toman su lugar, el árbitro aprieta el botón y medio segundo después el árbitro escucha ambos golpes simultáneamente y declara un empate. Los participantes reclaman, pues ambos declaran haber escuchado primero su golpe y un segundo después el del otro.

Discuta las respuestas que darían a las preguntas:

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

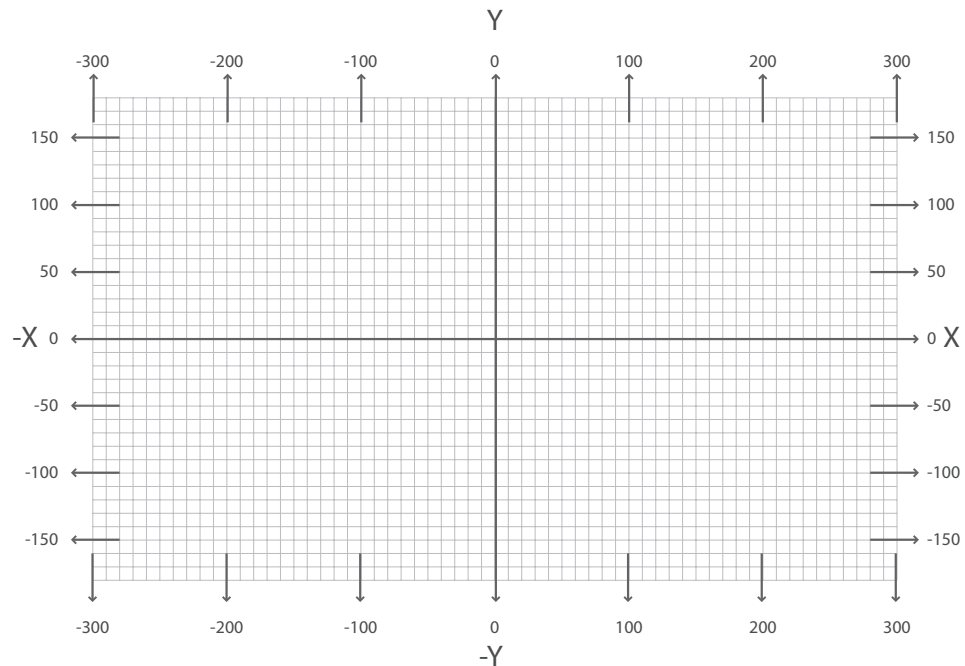
La percepción de los fenómenos depende desde dónde se observan; esto es, depende del punto de referencia. ¿Se aleja o se acerca? ¿Está arriba o abajo? Para responder a estas preguntas se debe indicar respecto a qué, o desde dónde se observa. En cada caso, la respuesta puede ser diferente, y aun así, correcta. Incluso se puede llegar a calificar a la otra observación como falsa, sin serlo, porque simplemente tiene otra referencia. Esto significa que es relativa a una determinada 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 el concepto de marco de referencia. Éste es un esquema geométrico compuesto por dos rectas perpendiculares, sobre las cuales se pueden ubicar distancias; el origen de esas distancias es el punto donde se cruzan las dos rectas.

Figura 15 | Plano cartesiano.



En un partido de fútbol, el movimiento de los jugadores y el balón durante el juego se puede describir tomando como referencia las características de la cancha y sus divisiones: área chica, área grande, medio campo, círculo central; línea de meta, banda lateral, esquinas y manchón de penalti.

Con estos conceptos se pueden relatar las jugadas de forma más precisa y se dará una idea clara de lo que pasó: “El balón lanzado en un tiro de esquina fue tomado ‘de palomita’ por el centro delantero en el área chica, a la altura del manchón de penalti, y salió de un cabezazo al ángulo superior derecho. Tal fue el impacto que dejó parado al portero. ¡Fue un golazo!”

Sería imposible describir la jugada anterior sin emplear las palabras “esquina”, “área chica”, “manchón de penalti”, “ángulo superior derecho”. Cada una de estas palabras son referencias que dan idea del movimiento del balón; sin ellas no se podría saber la loca-

lización del balón, ni por dónde se movió. No se podría dar una descripción de lo que se llama *trayectoria*.

En la descripción de la jugada, también se usaron los términos de “cabezazo” y “dejar parado al portero”. Ambos conceptos tienen que ver con la rapidez de la acción y, con ellos, se completó la descripción del movimiento del balón, el cual se compone de dos conceptos: dirección y velocidad.

Una descripción más exacta requiere de una descripción geométrica del movimiento, en términos de un *marco de referencia*, dentro del cual pueda definirse con precisión una *trayectoria*.

Una trayectoria es la curva que marca la posición de un objeto en el espacio durante su recorrido; en este caso, los jugadores y el balón, en el espacio de la cancha. ¿Cómo se determina la posición de un objeto sobre un campo de fútbol?

Hay lugares que pueden especificarse fácilmente, como el centro del círculo central, mientras que los manchones de penalti, las esquinas de las áreas chicas y grandes necesitan adicionalmente que se diga si son los de uno u otro lado de la cancha. De esta manera, si el balón o el jugador se hallan sobre cualquiera de los puntos anteriores, su posición queda bien determinada.

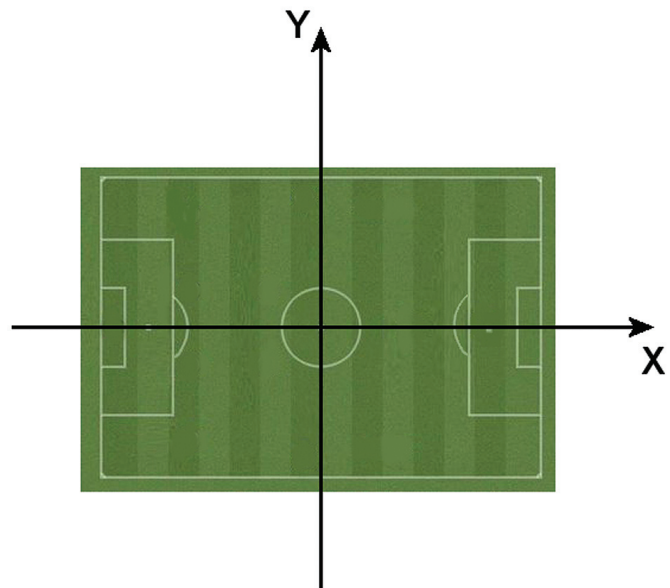
Pero, ¿cómo se puede dar la posición de un objeto, en cualquier otro sitio, sobre el terreno de juego? Para resolver un problema similar, el científico francés René Descartes (1596-1650) ideó el marco de referencia formado por dos líneas perpendiculares, llamando *origen* al punto de intersección.

En nuestro caso, construiremos el marco de referencia de la siguiente manera: sobre cada una de las líneas paralelas —que coinciden con una línea de banda— y las perpendiculares —que coinciden con una de meta— se colocan marcas separadas un metro de distancia. Nuestro origen queda definido como la intersección de las líneas en la esquina inferior izquierda. De este modo, un punto cualquiera sobre el terreno queda determinado por un par de números: la distancia sobre la línea de banda a la esquina y la distancia sobre la línea de meta a la misma esquina. A estos números se les llama *coordenadas*. Por ejemplo, el centro del campo tendrá como coordenadas: 52.5 metros sobre la línea de banda y 42.5 metros sobre la línea de meta, en una cancha oficial de 105 metros de largo por 85 metros de ancho.


Por comodidad, se le llama eje x a la línea de banda y eje y a la línea de meta. Con esto, la localización de un punto cualquiera se denota por un par de números dentro de un paréntesis (x, y) . De este modo, el punto central tiene posición $(52.5, 42.5)$; o sea: $x = 52.5, y = 42.5$.

Se dice, además, que una superficie, como la cancha, es un espacio de dos dimensiones y que, por eso, se requieren dos números para representar la posición de cualquier punto sobre ella (x, y) .

Figura 16 | Cancha de fútbol con ejes cartesianos.



ACTIVIDAD

 Dibuje una cancha de futbol, y sobre ésta los ejes x y y . Ahora, 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, aún no es posible describir la altura que lleva el balón. Esto se resuelve asignando un tercer número que indique la altura (en metros) sobre el piso, que se representa por la letra z . Con ello, las coordenadas del balón sobre el centro de la cancha serían $(52.5, 42.5, 2)$, si es que el balón está suspendido a una altura de 2 metros.

Es claro que el movimiento del balón ocurre en un espacio de tres dimensiones y, por lo mismo, se requieren tres números para fijar su posición. El espacio de tres dimensiones es en el que nos movemos.

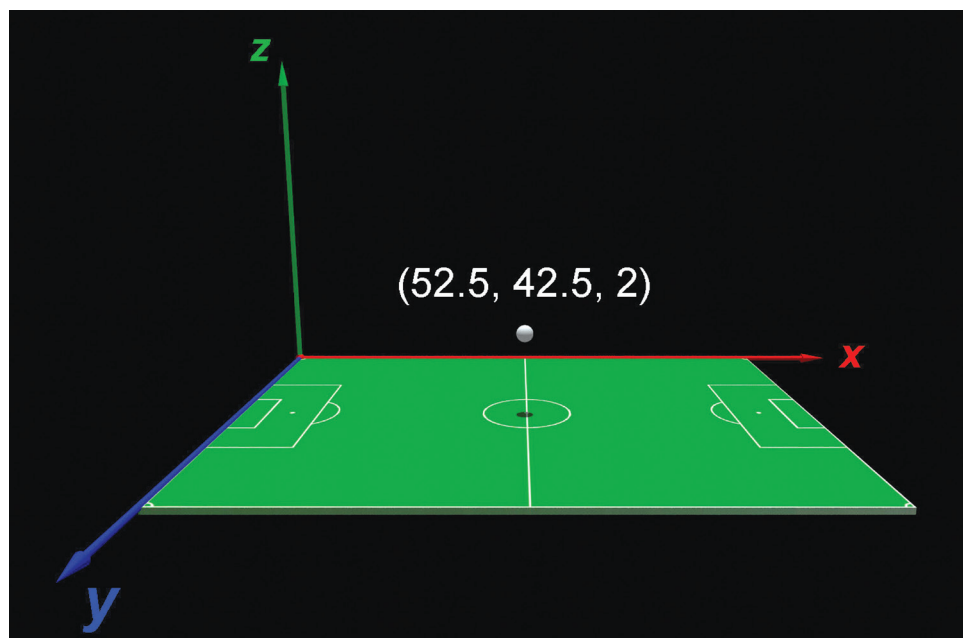
Si esta trayectoria fuera muy complicada y se le muestra a otra persona, seguramente diría: “Ya veo que el partido estuvo movidito. Mira nomás cómo se ha paseado el esférico por toda la cancha. Y ha habido varios goles, cinco para ser exactos. Pero, ¿no tengo ni idea del sentido, ni de la rapidez con que el balón se ha estado desplazando!”

Lo que se tiene que hacer ahora es introducir el tiempo en la descripción del movimiento y definir los conceptos de *rapidez* y de *sentido*. Para introducir el tiempo en la descripción geométrica del movimiento se tiene que asignar a cada punto un tiempo, que se representa por la letra t .

La frase: “El balón estuvo en el punto $(-1, 42.5, 0)$ en el minuto 36 del primer tiempo”, significa que hubo un gol en la portería izquierda en el minuto 36 del primer tiempo.

El gol, que es un evento o suceso, también se pudo especificar por los cuatro números siguientes: $-1, 42.5, 0, 36$, en donde los tres primeros $(-1, 42.5, 0)$ corresponden a la posición del balón sobre la superficie de la cancha y el cuarto se refiere al tiempo.

Figura 17 | Posición del balón.



≈ LECTURA ≈

El Sistema Internacional de Unidades (SIU)

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 con cada lugar y época. Con el avance de las comunicaciones y contactos entre los diferentes pueblos del mundo, ante un intercambio de mercancías, de tecnologías y de conocimiento científico, cada vez mayor, se evidenció la necesidad de acordar un sistema universal de unidades de medida. Así, desde el siglo XIX se empezaron a crear acuerdos para dar un uso más extendido a 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 Pesos 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.

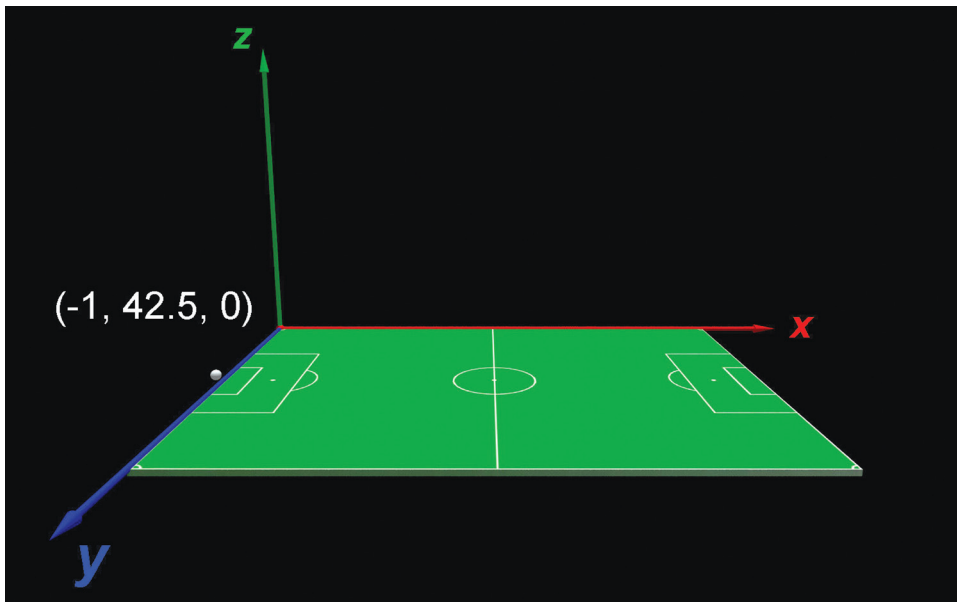


Figura 18 | Gol.

Figura 19 | Película de gol.

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*.

Una trayectoria en el espacio de eventos de cuatro dimensiones describe completamente el movimiento del objeto, pero es difícil de visualizar. Para simplificar, suponga que el objeto —el balón de nuestro ejemplo— se mueve en una sola dimensión espacial, que ahora es la línea que pasa por el centro del campo y el centro de las porterías. Con la dimensión del tiempo, el espacio de descripción del movimiento del balón será el de un espacio de dos dimensiones, como el de la figura 20 (p. 40).

Sobre el eje horizontal de la figura se mide la distancia (en metros) del origen (localizado en el centro del campo) al balón. A este punto se le asigna $x = 0$. En el eje vertical se representa el tiempo (medido en minutos), que se supone empieza a contarse con un reloj en el instante $t = 0$.

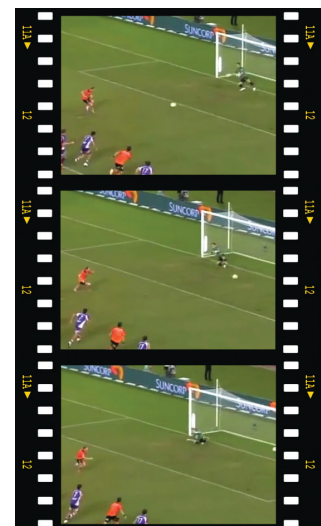
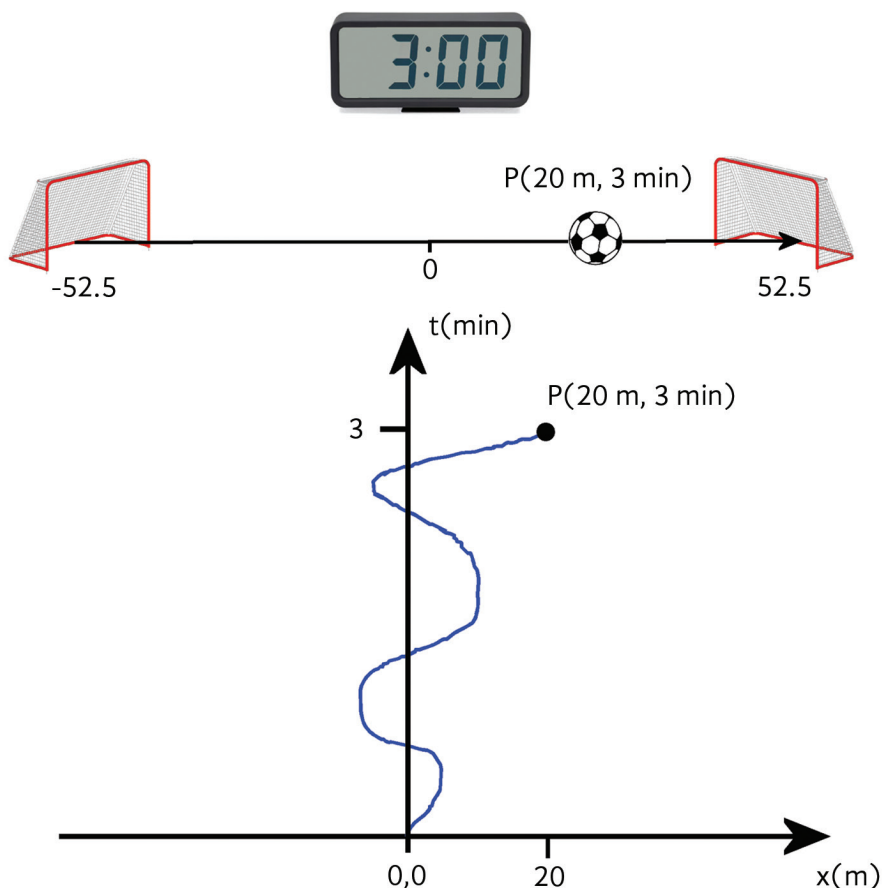


Figura 20



Un punto P , de coordenadas (x, t) , que se denota por $P(x, t)$, da la posición x del balón en el tiempo t . Si se trata del evento durante el juego, en el que el balón está a 20 metros del centro de la cancha ($x = 20$ metros) y el reloj del árbitro marca un tiempo transcurrido de 3 minutos, el punto P sería el evento $(20, 3)$.

Ahora, si el centro delantero observa que el portero contrario está muy distraído, trata de meter un gol con un potente disparo a ras del suelo. Le pega al balón logrando imprimirle una rapidez de unos 120 km/h (ciento veinte kilómetros por hora).

Surgen varias preguntas: ¿Qué es la *rapidez*? ¿Cómo se representa, en el espacio de eventos de dos dimensiones, el movimiento del balón mediante un conjunto de puntos (x, t) ? Seguramente ha escuchado antes el concepto de *rapidez*, así como el de *velocidad*.

Cuando se dice “ciento veinte kilómetros por hora” se habla de una *cantidad escalar*. Para expresar una cantidad escalar basta con dar su tamaño y las unidades en que se mide; por ejemplo, 25°C, 45 segundos, 30 metros, 3 kilogramos, etcétera.

Para expresar la velocidad, además de dar la rapidez (su tamaño y unidades), es necesario especificar su orientación, es decir, hacia dónde se dirige; por ejemplo, 120 kilómetros por hora hacia el sur.

A las cantidades que tienen magnitud y orientación se les llama *cantidades vectoriales*. La velocidad es una cantidad vectorial, así como el desplazamiento y la fuerza, entre otras.

El *desplazamiento* del balón de la posición inicial x_i a la posición final x_f se denota por $\Delta x = x_f - x_i$. (Esta ecuación se lee “delta equis igual a equis efe menos equis i”;

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

Observe que el desplazamiento, al igual que cualquier cantidad vectorial, tiene dos características: su tamaño o *magnitud*, que es la cantidad sin tomar en cuenta el signo, también conocida como valor absoluto, y se escribe como $|x_f - x_i|$, y su orientación, que para el caso unidimensional es positiva si $x_f > x_i$, lo que se lee como “ x_f mayor que x_i ” y negativa si $x_i > x_f$. En el primer caso, el desplazamiento es hacia la derecha y, en el segundo caso, hacia la izquierda. Así que el desplazamiento es un vector.

Un vector se representa geoméricamente con una flecha. Para escribir una cantidad vectorial se le agrega una flecha arriba de la letra; por esto, el desplazamiento se escribe como $\Delta\vec{x}$, y la velocidad por \vec{v} . 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 .



Figura 21

La rapidez se calcula mediante el cociente de la magnitud del desplazamiento entre el lapso de tiempo $\Delta t = t_f - t_i$:

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

donde v (sin flecha) denota la rapidez o magnitud de la velocidad. Entonces se puede decir que el balón se mueve con una velocidad \vec{v} de 120 km/h, que apunta hacia la portería.

Note ahora cómo, con el valor de la rapidez y el de la distancia del centro del campo a la portería, se puede *predecir* el lapso que tarda el balón en llegar a la meta. Antes de hacer este cálculo, ¿cuántos segundos cree que tardará el balón en incrustarse en el marco contrario? Si ha jugado fútbol, o lo ha visto en la televisión, sabe que ese tiempo es corto, apenas unos segundos.

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

$$\Delta t = \frac{|\Delta x|}{v} = \frac{52.5 \text{ metros}}{120 \frac{\text{kilometros}}{\text{hora}}} = \frac{52.5 \text{ metros}}{\frac{120 \times 1000 \text{ metros}}{3600 \text{ segundos}}} = \frac{52.5 \text{ metros}}{33.3 \frac{\text{metros}}{\text{segundo}}} = 1.6 \text{ segundos}.$$

El viaje del balón del centro del campo a la portería apenas dura 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 en la cancha o los anuncios que están a su alrededor. Pero si se ve en la televisión, cuya imagen es captada por una cámara que a veces se mueve sobre la banda siguiendo al balón, éste se ve fijo en la pantalla, la cual es ahora el nuevo marco de referencia. Ahora son los anuncios los que se mueven con la misma rapidez, pero en sentido contrario.

Se profundizará en la descripción del movimiento, sólo en los casos en los que la trayectoria sea rectilínea.

≈ 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 la descripción del movimiento de los barcos en alta mar. Resolver el problema fue básico para la seguridad de las naves, pues de ello dependía que el comercio pudiera llevarse a cabo. Una equivocación solía significar una catástrofe, como sucedió en muchos casos. La prosperidad de muchas naciones, en particular la inglesa en el siglo XVII (donde nació y vivió Isaac Newton), demandaba respuestas a esta pregunta: ¿cómo se determina la posición de un barco sobre la superficie del mar?

La posición de un punto sobre la superficie de la Tierra queda determinada por dos números: latitud y longitud. La lati-

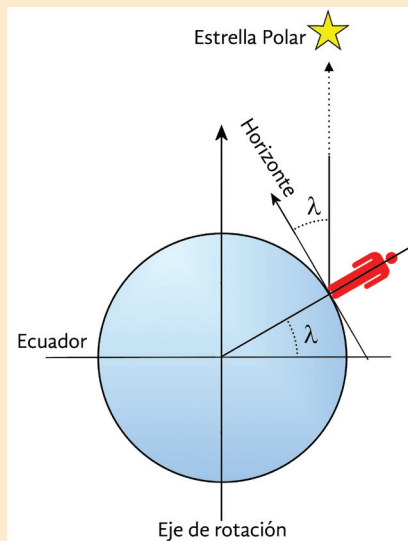


Figura 22

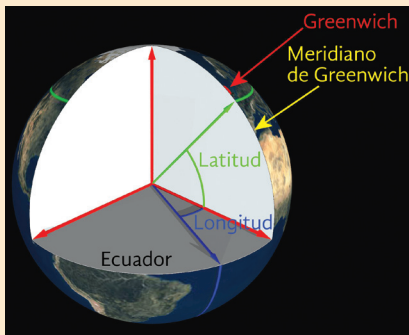


Figura 23 | La longitud respecto del meridiano de Greenwich.

tud 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 al Ecuador, ambas líneas contenidas sobre el plano meridiano del lugar.

En la figura 22 se aprecia que λ es también el ángulo que forma la línea que va del observador a la Estrella Polar con la línea vertical 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; por ejemplo, el observatorio astronómico de la ciudad inglesa de Greenwich (fig. 23).

Pero la línea vertical en este sitio, a diferencia del Polo Norte, no está señalada en el cielo por ninguna estrella fija (una cuya posición no cambie en el cielo estrellado durante la noche debido a la rotación de la Tierra). Por esto, 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 de un barco deben llevar un reloj que marque la hora del meridiano de Greenwich. Este reloj se puso a tiempo en dicha ciudad, de modo que marque las 12 del mediodía en el preciso momento en que el Sol llegó a su altura máxima.

Después, en el barco en alta mar, se determina el momento en que el Sol llega 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 marca, por ejemplo, las 3 de la tarde, entonces la longitud del lugar se puede calcular como:

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

La historia de la ciencia registra otros intentos para la medición del tiempo, aparte de los relojes mecánicos y el reloj astronómico solar. Estos otros intentos incluyeron la observación del movimiento regular de la Luna y el de las lunas de Júpiter.

El motivo por el cual el hombre desarrolla la ciencia es la solución de problemas que son importantes para la sociedad. Con esta motivación, hubo científicos que destacaron estudiando y diseñando dispositivos o métodos para medir el tiempo. Así, por ejemplo, Christiaan Huygens (1629-1695) estudió las bases científicas del péndulo, contribuyendo en la construcción de relojes mecánicos; Galileo Galilei (1564-1642) observó y midió el periodo de rotación de las lunas de Júpiter, o el mismo Isaac Newton (1642-1727), quien sentó las bases para la dinámica y la teoría de la gravitación.

ACTIVIDAD

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



Figura 24 | Mapa con husos horarios.

Consideremos a manera de ejemplo el caso siguiente: un carrito 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 “O”. La coordenada x representa la distancia recorrida por el carrito.

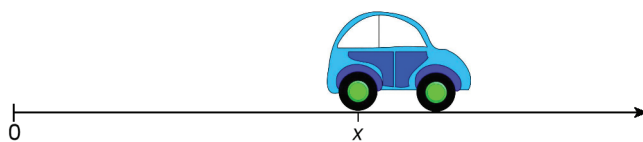


Figura 25

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

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

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

Esta tabla de datos nos da una idea sobre el movimiento del carrito, pero es más fácil analizar el movimiento 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 y en el vertical las distancias, y se gradúan los ejes. En el eje horizontal los valores de tiempo van de 0 a 30 segundos, mientras que en el eje vertical los valores de distancia van de 0 a 210 metros. En este ejemplo se usan intervalos de 5 para el eje horizontal y de 50 para el eje vertical (fig. 27). 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 la figura 27.

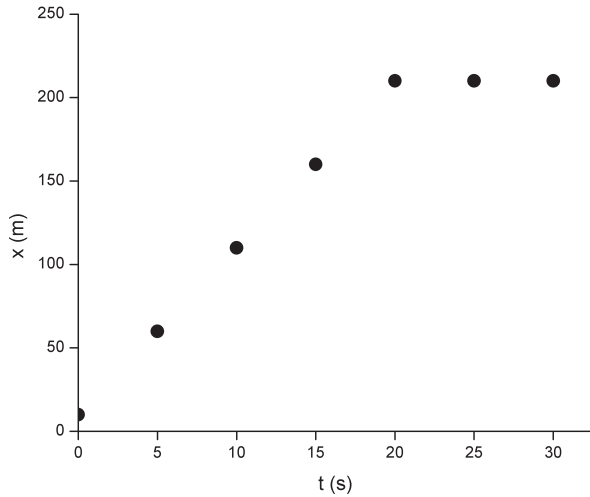


Figura 26

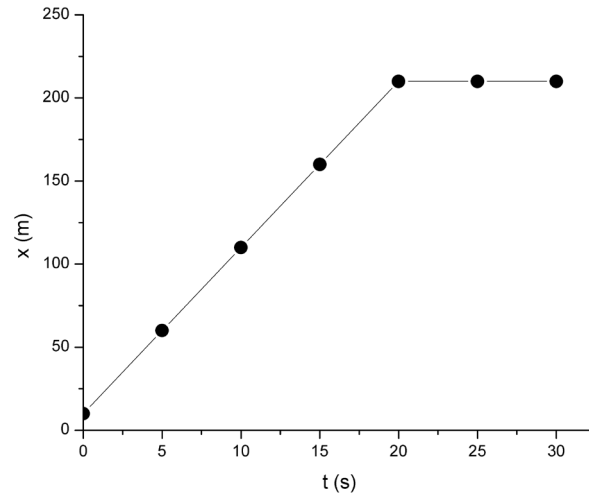


Figura 27

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

Se puede conocer la posición del carrito en el instante que se quiera dentro del intervalo de tiempo estudiado. Para ello localice primero el valor del tiempo que quiera sobre el eje horizontal de la gráfica, trace una línea vertical a partir de ese punto hasta que interseque la línea de la gráfica; en ese punto trace una recta horizontal que interseque al eje vertical. Este punto es la posición x del carrito en el tiempo elegido t . Por ejemplo, para $t = 9$ s, el carrito se encuentra a una distancia de 100 m del punto de referencia (fig. 28).

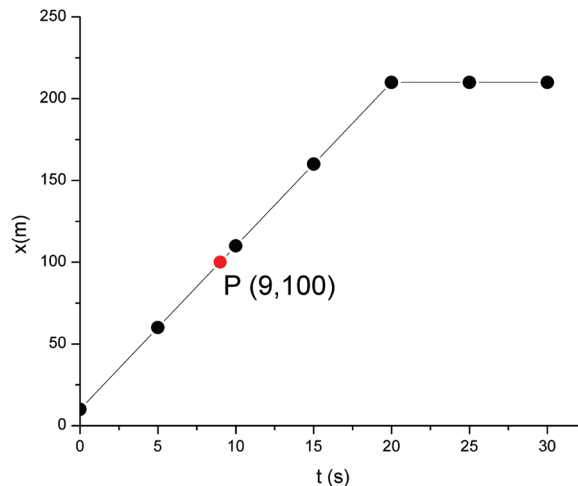


Figura 28

Otra información que da la gráfica es la posición inicial del carrito; esto es, para $t = 0$ s. Para este valor de t , la coordenada x tiene un valor de 10 m; lo que dice que inicialmente el carrito se encontraba a una distancia de 10 m del punto de referencia O.

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

Hasta aquí, la gráfica “ x en función de t ” da información sobre el movimiento del carrito.

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 está dada por la diferencia $\Delta t = t_2 - t_1$, que en este caso es de 10 s. 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.

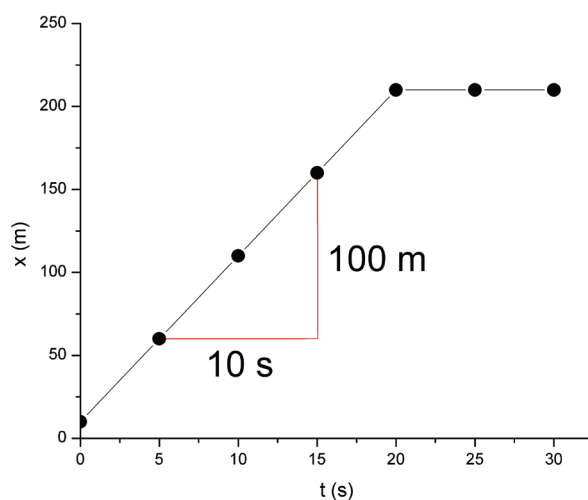


Figura 29 | La diferencia de altura representa la distancia recorrida por el carrito en el intervalo.

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

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

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

Si ahora se fija la distancia recorrida Δx , entonces, la rapidez varía inversamente proporcional con el intervalo Δt . Así, si el carrito 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. En el espacio de la primera recta podemos 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, 10m/s. Esto indica que el carrito se movió con la misma rapidez en todo el intervalo de 0 a 20 s. A éste se le llama *movimiento rectilíneo uniforme*.

Ahora bien, de $t = 20$ s en adelante, en la gráfica 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 el caso de una recta horizontal en la gráfica “ x en función de t ”, la rapidez vale cero en todo ese intervalo de tiempo. A dicho estado de movimiento se le llama *reposo*.

Note que la rapidez está directamente relacionada con la inclinación o pendiente de la recta en la gráfica “ x en función de t ”. A mayor inclinación, mayor rapidez.

ACTIVIDAD

Considere el movimiento representado en la siguiente gráfica (figura 30).

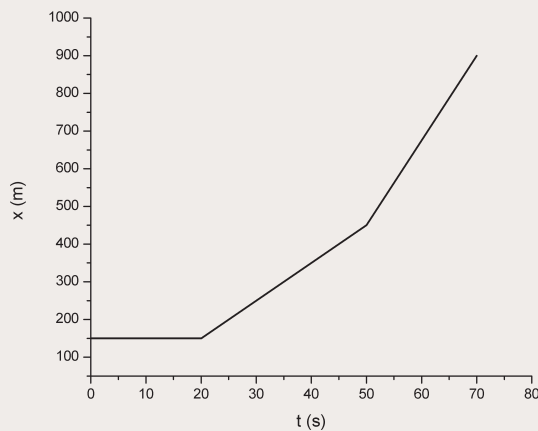


Figura 30

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

- Para cada intervalo de tiempo escriba:
 - la duración
 - la distancia recorrida
 - la rapidez
- Las pendientes o inclinaciones de los segmentos rectilíneos; ¿son iguales o diferentes?
- Los valores de la rapidez para los tres intervalos de tiempo; ¿son iguales o diferentes?
- 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.

Observe ahora la figura 31. La línea roja corresponde al movimiento de Juan, y la verde, al de 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?

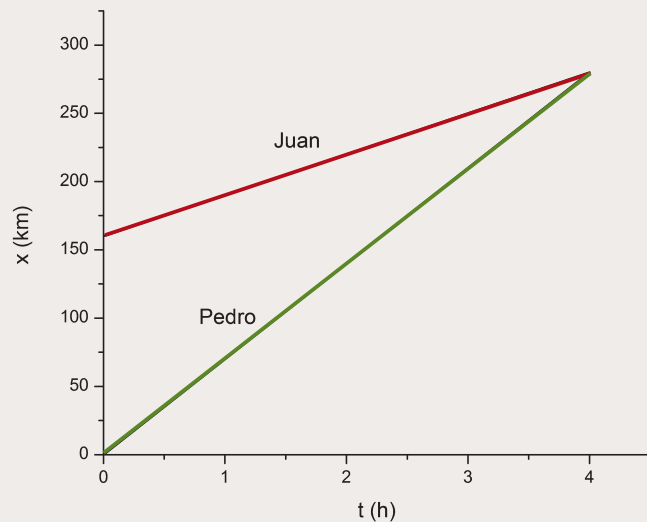



Figura 31

ACTIVIDAD

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

Necesita:

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

En una pared pegue verticalmente 1.5 metros de cinta adhesiva. Luego dibuje sobre la cinta cinco rayas horizontales separadas treinta centímetros cada una. Procure que la primera marca esté a 30 centímetros 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 primera 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 centímetros 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 cuando el filtro pase por la marca de 0.0 metros, 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. 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.

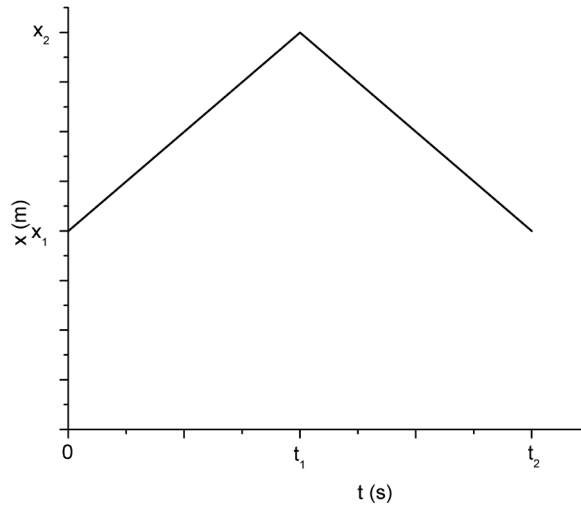
$X(\text{m})$	t_1	t_2	t_3	t_{prom}
0.0				
0.3				
0.6				
0.9				
1.2				
1.5				

Haga la gráfica de “distancia en función del tiempo” para este movimiento, usando los valores de t_{prom} . Conteste las preguntas siguientes:

1. ¿Qué información da la gráfica “ x en función de t ” sobre el movimiento de descenso del filtro de café?
2. ¿Cuál es la rapidez en centímetros/segundos?

La figura 32 corresponde al movimiento de un objeto que parte en el tiempo 0 de la posición x_1 , avanza con rapidez v_1 hacia a la posición x_2 a donde llega en el tiempo t_1 . En seguida regresa con una rapidez v_2 al origen, arribando al tiempo t_2 . Note que $v_2 > v_1$ y que la velocidad \vec{v}_1 apunta a la derecha, en tanto que \vec{v}_2 lo hace hacia la izquierda.

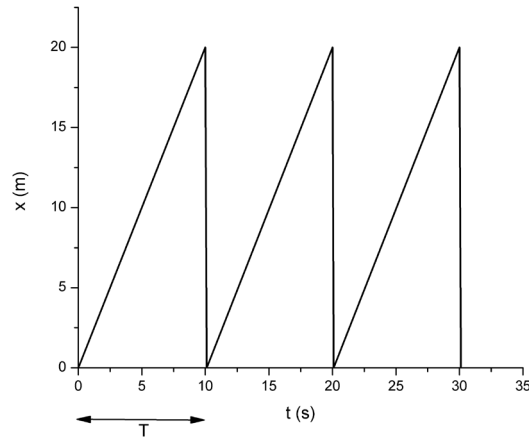
Figura 32



La figura 33, en forma de sierra, representa el movimiento de un carrito, compuesto de trayectorias sucesivas en que 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 .

Figura 33



Otro movimiento importante de estudio es el de un balón pegado a un resorte, estando ambos sobre una mesa, oscilando alrededor de un punto que se llama de equilibrio (fig. 34).

El movimiento en el espacio (x, t) es también como una sierra, excepto que ahora las líneas están redondeadas. Esto se debe a que la rapidez de desplazamiento del balón no es constante. Puede ver que hay un instante, en la cresta de la gráfica, en que el movimiento del balón cambia de dirección. En ese punto, la rapidez es cero; luego ésta empieza a

crecer hasta llegar a un valor máximo al pasar el balón por el punto de equilibrio, y de aquí continúa decreciendo hasta hacerse nuevamente cero en el punto de retorno.

La distancia entre cresta y cresta se llama *longitud de onda* de la oscilación y se denota por la letra λ (lambda) del alfabeto griego y corresponde a una ida y vuelta del balón. La frecuencia que se escribe como f , es la cantidad de oscilaciones completas que ocurren en un segundo. La relación matemática entre estas características del movimiento oscilatorio se analizará con más detalle a continuación.

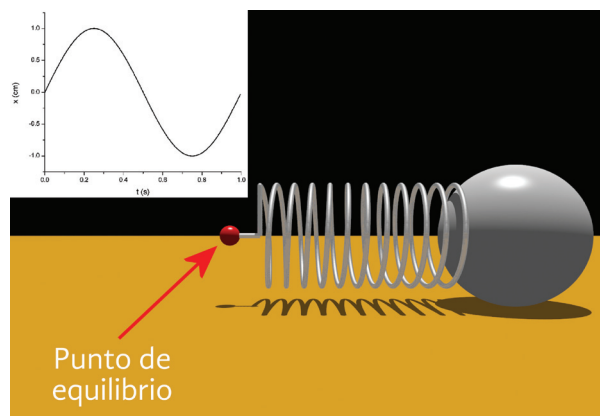


Figura 34

Un tipo particular de movimiento: el movimiento ondulatorio

Relación longitud de onda y frecuencia

Velocidad de propagación

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, o transversal, a la dirección en que la onda se desplaza. Esto mismo sucede en una onda transversal producida en un “resorte de gusano”.

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 35 | Ondas en agua.

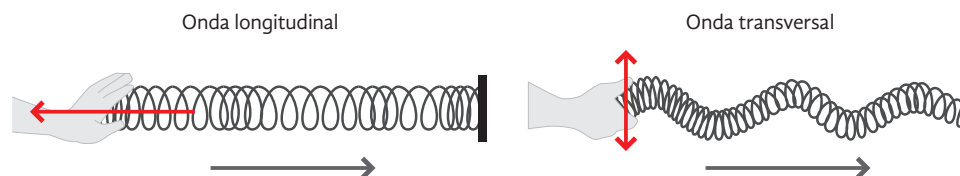
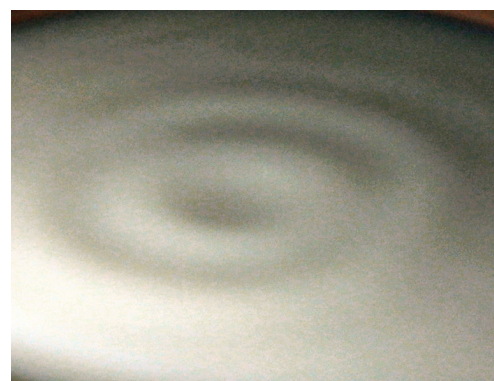


Figura 36 | Ondas transversales y longitudinales.

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 ver lo dicho con más sencillez y claridad. Quizá sepa que *la ola* fue inventada por aficionados mexicanos, durante el campeonato mundial de fútbol en 1986 en nuestro país.

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 bajándolas. Es un movimiento oscilatorio arriba-abajo. Los vecinos de uno de los lados, por ejemplo del derecho, atentos, 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*.

Un tsunami y un terremoto son también ondas, parecidas a la ola del estadio. Pero, mientras que la ola en el estadio de fútbol no ocasiona daños, un tsunami o un terremoto son capaces de provocar una catástrofe. ¿De qué tipo de onda se trata *la ola*, de una onda longitudinal o transversal? ¿Y un tsunami?

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, pues 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, que al captar las compresiones del aire producidas por las ondas hace que se perciban como *sonido*. El sonido conduce señales que llevan *información* y *energía*, como las palabras del lenguaje o la música, y la intensidad o volumen, respectivamente. En los tsunamis y terremotos, por desgracia, el objeto receptor de la señal es el ambiente y las poblaciones.

Otro tipo de ondas, como las electromagnéticas, transportan señales que son la base de las telecomunicaciones, y son indispensables actualmente para nuestra civilización. ¿Se imagina un mundo sin televisión, teléfonos celulares, radio, internet, etcétera? Sin las ondas electromagnéticas tampoco se habría podido generar nuestra concepción del Universo, pues la información de su estructura nos llega mediante este tipo de ondas.

Una descripción más detallada de las características del movimiento ondulatorio se hará tomando como objeto de estudio el “resorte de gusano”, tanto para ondas longitudinales, como transversales.

ACTIVIDAD

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

Con ayuda de un compañero frente a usted, coloque el resorte en una superficie horizontal, manténganlo estirado y amárrele 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 observar si se fija en la espira que tiene el estambre, y se dará cuenta de que también 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, verá que la perturbación ondulatoria avanza hacia adelante, mientras que cada espira (por ejemplo, la del estambre) sólo oscila en dirección perpendicular a aquella en la que avanzan las ondas. Esta vez está produciendo ondas transversales.

Con la ayuda del siguiente diagrama (fig. 37) se pueden identificar algunos parámetros básicos de las ondas transversales.

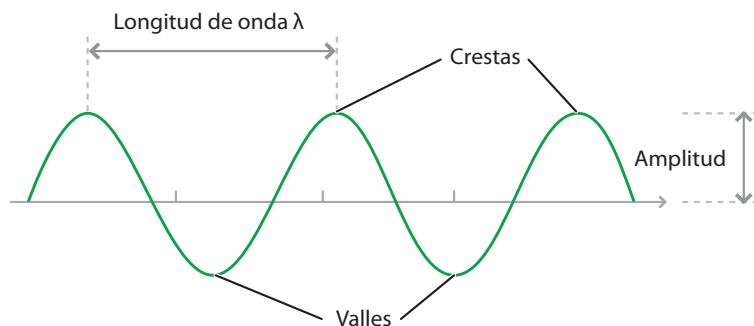


Figura 37 | Partes de una onda.

Como se mencionó, la distancia entre cresta y cresta se llama longitud de onda (λ). El número de ondas completas que pasan por un punto en una unidad de tiempo es la frecuencia, que se representa con la letra f . 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, tendremos una frecuencia de 100 Hz. Una onda de radio tiene una frecuencia que puede llegar a más de 100 mega Hertz, es decir, se repite más de cien millones de veces en un segundo, y hay frecuencias mucho más grandes.

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 $\frac{1}{2}$ segundo y éste es su periodo.
- Si el periodo es de $\frac{1}{10}$ s, la frecuencia será de 10 Hz, y así sucesivamente.

Por lo tanto

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

Lo cual quiere decir que 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 carrito con 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:


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

Dado que $f = \frac{1}{T}$, entonces

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f.$$

Observe algo interesante: si se agita el resorte de gusano lenta o rápidamente se puede aumentar o disminuir el tamaño o longitud de la onda λ . Esto hace que su periodo T también varíe, disminuyendo o aumentando. Pero si se toma el cociente de la longitud de onda y el periodo $\frac{\lambda}{T}$, que es la rapidez de propagación de las ondas, verá que no cambia.

ACTIVIDAD

 Para comprobar que las ondas sonoras se propagan a través de la madera, apoye su oreja en uno de los extremos de una mesa en tanto que un compañero golpea el otro extremo con un lápiz o una regla.

Si se repite el experimento con un tipo de resorte más “duro”, aumenta la rapidez de propagación, y disminuye si el resorte es más “blando”. ¡Compruébelo!

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

Si imagina un sólido como hecho de átomos y moléculas fuertemente unidas por resortes duros, y que los átomos y moléculas de un líquido están débilmente 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 imágenes o modelos de la realidad y así hacer predicciones. Si la realidad no se comporta como dice el modelo, habrá que cambiarlo, como ocurrió al pasar de los modelos aristotélicos a los newtonianos, lo que se verá más adelante.

≈ LECTURA ≈

La velocidad del sonido en el aire

La naturaleza del sonido como fenómeno físico se empezó a estudiar alrededor de 1640, cuando el matemático francés Marin Mersenne (1588-1648) midió su velocidad, frente a los montes escarpados, midiendo el tiempo que tardaba en escuchar el eco.

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 la escuela y oye los gritos y risas de los estudiantes a pesar de la gruesa barda que la rodea. A este efecto del sonido 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 estos últimos son del tamaño de la longitud de onda del sonido. La longitud de onda del sonido de las voces de las personas dentro de una habitación es de cerca de un metro, en tanto que las dimensiones de las ventanas y puertas también.

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

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



Figura 38 | Ondas saliendo de un tambor. Más oscuro, mayor densidad; menos oscuro, menor densidad.

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 espiras comprimidas del resorte corresponden a una capa de alta densidad de aire, y las espiras extendidas del resorte a una capa de baja densidad, representadas por zonas oscuras y claras, respectivamente.

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.

Hay movimientos oscilatorios o vibraciones que, según su frecuencia, no necesariamente son detectadas por nuestro oído. 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 de 20 000 Hz no se oyen; se las llama infrasónicas y ultrasónicas, respectivamente. Algunos animales, como los perros y los murciélagos, pueden captar vibraciones ultrasónicas.

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 de 1 cm de longitud.

Tono y timbre

En una guitarra las cuerdas delgadas vibran a un ritmo mayor que las gruesas; esto es, presentan más vibraciones por segundo, es decir, de mayor frecuencia, y dan un sonido agudo. Las cuerdas más gruesas, por el contrario, vibran a un ritmo menor presentando menos vibraciones por segundo, es decir, de menor frecuencia, y dando un tono grave. Al hablar de qué tan agudo o grave es un sonido se hace referencia al tono.

ACTIVIDAD

➡ Acerque su oreja a un tubo largo de metal, como el de una escalera. Pida a un compañero que golpee el tubo 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.

ACTIVIDAD

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

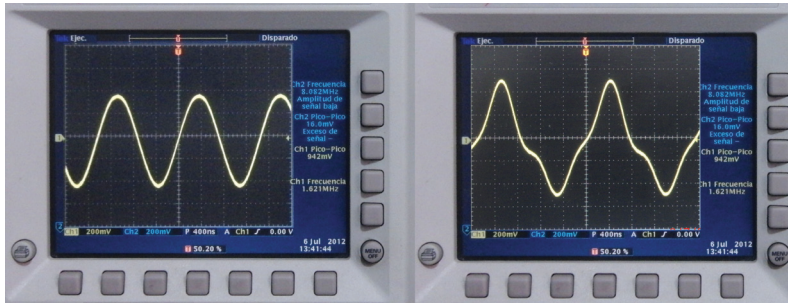


Figura 39 | Pantalla de osciloscopio mostrando, en un caso, una onda sinusoidal; y en el otro caso, una onda “sinusoidal” modificada por pequeñas deformaciones correspondientes a los armónicos.

Con un diapasón se puede generar una nota musical bien definida, misma que da lugar a una curva sinusoidal perfecta, como se ve en la figura 40. En cambio, con una flauta se puede generar la misma nota pero, en este caso, se observan pequeñas deformaciones de la onda, llamadas armónicos, que permiten diferenciar un instrumento de otro.

Existe una relación directa entre la frecuencia de vibración de un objeto y el tono del sonido producido. Ahora se estudiará cómo cambia la frecuencia de vibración (el tono) de una cuerda estirada al variar su longitud.

La frecuencia de vibración de una cuerda 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 (1564-1642) y el francés Marin Mersenne (1588-1648) estudiaron experimentalmente y determinaron la relación funcional entre la frecuencia y las cuatro variables mencionadas; tres de ellas (diámetro, densidad y fuerza aplicada para tensar la cuerda) se mantendrán fijas y sólo se variará la longitud. Este sencillo experimento se puede realizar fácilmente y obtener así la relación funcional entre la frecuencia de vibración y la longitud de la cuerda. Bastará con tener control sobre la tensión de la cuerda y contar con aparatos 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.

Un violinista presiona la cuerda con el dedo en el punto deseado y con ello determina la longitud de la cuerda y el tono a obtener al pasar el arco por ella; en tanto que en los segundos instrumentos, provistos de trastos situados a diferentes partes del brazo y a distancias predeterminadas, el músico presiona las cuerdas para limitar sus longitudes y obtener así la entonación precisa.

La frecuencia de vibración de una cuerda en tensión constante varía de manera inversa con su longitud. A menor longitud, mayor frecuencia (tono), y viceversa. En lenguaje matemático se escribe como sigue.

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

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.

Además, se pueden producir sonidos con la misma intensidad y el mismo tono tocando un violín, una trompeta, un piano o una flauta, etc. El oído reconoce la diferencia entre los instrumentos identificando cada uno de ellos; a esta diferencia se le denomina el *timbre del tono*.



Figura 40 | Diapasón.

≈ 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 es el siguiente:

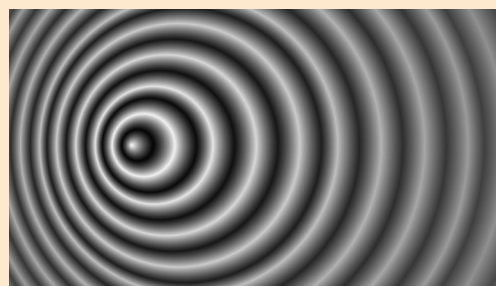


Figura 41 | Efecto Doppler, ondas en el agua.

$$f_o = \frac{v_s}{v_s - v_f} f, \text{ cuando la fuente sonora se acerca al observador} \quad (1)$$

$$f_o = \frac{v_s}{v_s + v_f} f, \text{ cuando la fuente sonora se aleja del observador} \quad (2)$$

donde v_s es la velocidad del sonido, v_f es la velocidad de la fuente, y f es su frecuencia original. Que el cambio de frecuencia de la onda dependa de la velocidad de la fuente convierte a este fenómeno en un poderoso instrumento de medición de velocidades de fuentes, objetos, estrellas y galaxias, y hasta de la sangre en nuestras venas.

Cómo se produce la voz

El estudio de las vibraciones en el aire es importante por varias razones. En particular, porque nos comunicamos a través de ellas: las palabras son producidas por la vibración de nuestras cuerdas vocales. Presione su garganta con sus dedos al tiempo que emite un sonido; podrá percibir la vibración de las 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, estas cuerdas duplican prácticamente esta longitud.

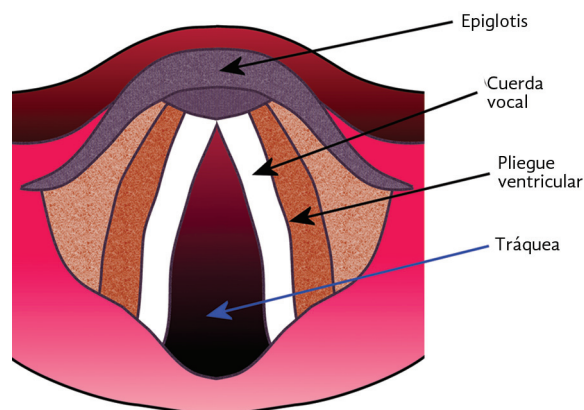


Figura 42 | Diagrama de las cuerdas vocales.

Las cuerdas están separadas unos pocos milímetros cuando no pasa aire por ellas, y se abren ampliamente al respirar. Comienzan a vibrar debido a las corrientes de aire que llegan a ellas desde los pulmones, pasando por la tráquea, produciendo una interrupción periódica del chorro 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 se emplean al hablar.

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

LA DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE LOS OBJETOS EN NUESTRO ENTORNO. EL TRABAJO DE GALILEO: UNA APORTACIÓN QUE DIO ORIGEN A LA CIENCIA MODERNA

¿Cómo es el movimiento de los cuerpos que caen?

En una actividad anterior se estudiaba un filtro de café que caía libremente, y que lo hacía a velocidad constante. ¿Cómo sería la caída del mismo filtro, si le cambia la forma?

ACTIVIDAD

- a) Deje caer desde la misma altura varios objetos: el filtro de café, pero en varias formas —la original, de churrito, de bolita, etc.—, una canica, piedras de varios tamaños y formas, pelotas, etc. ¿Cuál llega primero al piso?
- b) Haga dos esferas del mismo tamaño, pero de diferente material; por ejemplo, una con papel normal y otra con papel aluminio: ¿cuál llega primero al piso?
- c) Construya ahora dos pelotas con hojas, una muy chica, apretando el papel al máximo y otra más grande 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?
 - ¿Piensa que el aire interviene en la explicación de esta diferencia?

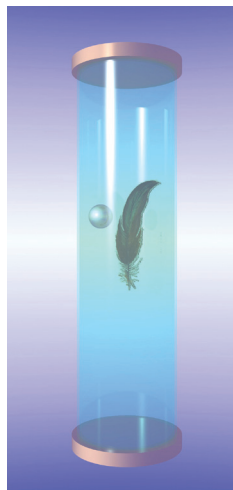


Figura 43 | Caída de objetos en un tubo vacío.

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

¿Ha sacado su mano de un 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 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 va extrayendo el aire poco a poco; 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 (fig. 43).

De estas experiencias se pueden sacar dos conclusiones:

Por un lado, que los objetos en el aire tardan tiempos diferentes en caer, dependiendo de su forma y composición. Y por el otro, 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 observar fácilmente (véase actividad p. 57). El estudio de estos y otros movimientos ha ocupado las mentes de sabios filósofos desde la antigüedad, dando lugar a diversas e interesantes explicaciones, que se discutirán más adelante. Antes se verá la explicación de algunos de los movimientos descritos, utilizando para ello la representación gráfica.

En el caso de la caída del filtro de papel, su movimiento vertical en el diagrama (x, t) es como se muestra en la figura 44.

ACTIVIDAD

Sumerja una pelota de frontón, de ping pong o una esfera de madera en una pila con agua, hasta donde llegue su brazo. ¿Cómo se mueve cada una de ellas al soltarlas?

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

Prenda una vela. ¿Hacia dónde se dirige la flama?

Deje caer una piedra de su mano desde la altura del pecho. ¿Qué sucede?

Sostenga frente de usted, a la altura del pecho, un vaso con agua. 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.

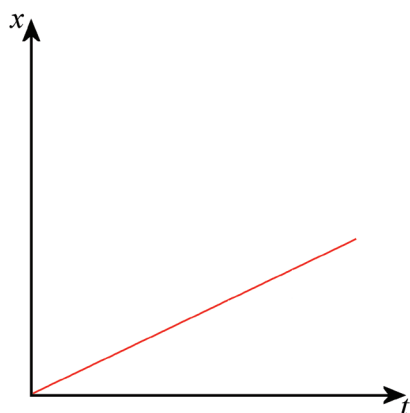


Figura 44

Ahora se introducirá 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 discutimos, se logra una mejor explicación del movimiento.

En el eje vertical se representa a la rapidez (v), y en el horizontal nuevamente al tiempo (t) (fig. 45).

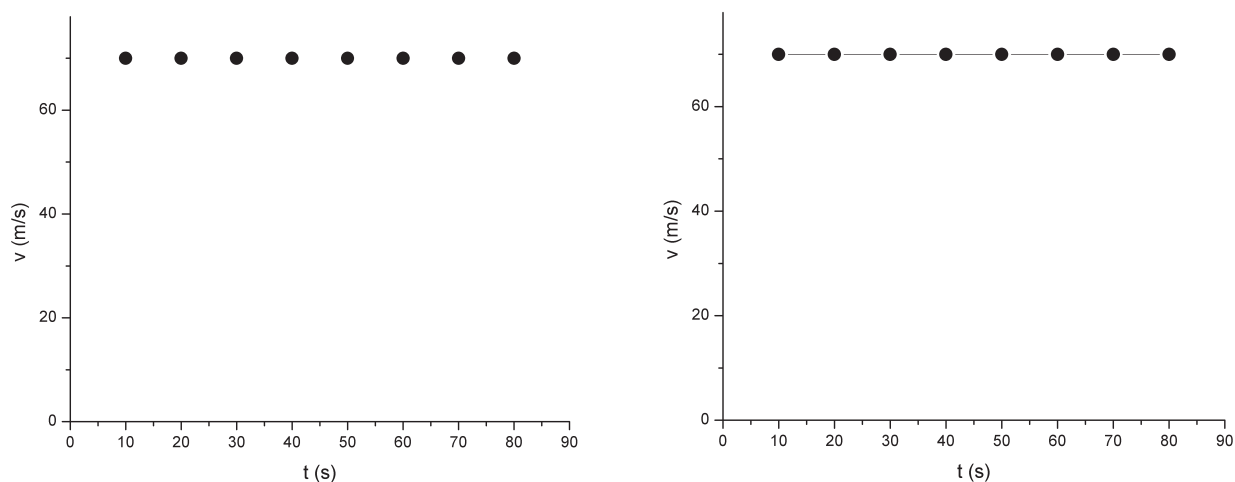


Figura 45

Como se observa en la figura 45, 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. Observe que v es la misma en los tiempos t_1 , t_2 , t_3 y t_4 .

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

Como se observa en la figura 46, la rapidez es constante en cada uno de los intervalos de tiempo, pero a su vez crece formando una escalera. Imagine ahora que los intervalos de tiempo son cada vez más pequeños, entonces los peldaños de la escalera se convierten en puntos. Si éstos se unen se obtiene una recta con una cierta inclinación (fig. 47).

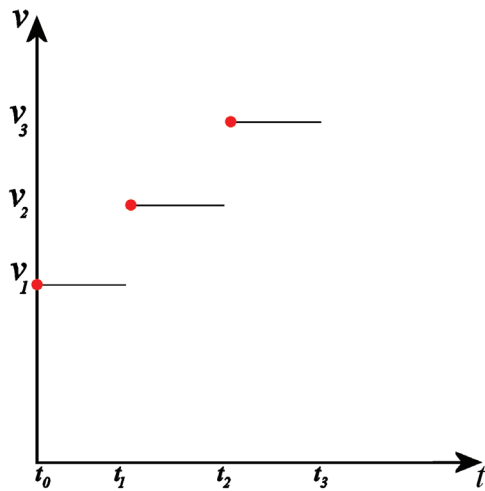


Figura 46

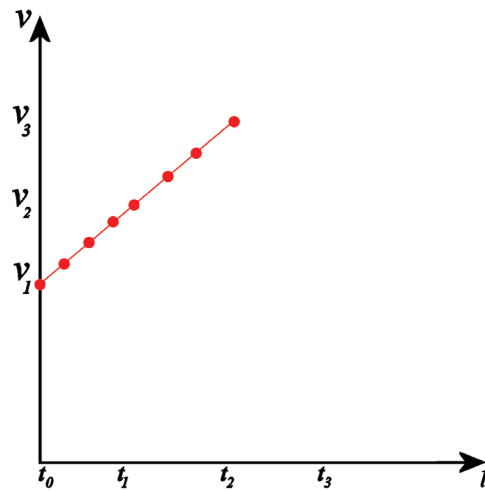


Figura 47

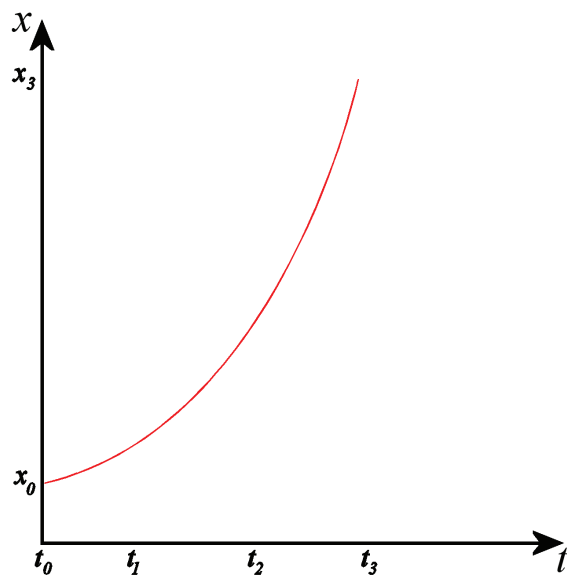


Figura 48

¿Cómo sería la correspondiente gráfica (x, t) para este movimiento? Recuerde que cuando se estudió el movimiento con velocidad constante, se observó que su gráfica (x, t) es una recta cuya inclinación es proporcional a la rapidez. 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, al unirlos, nos dan una curva creciente.


Se dice que un objeto se acelera cuando aumenta su rapidez, y que se desacelera cuando su rapidez disminuye. En la figura 48 se representa el movimiento de un objeto que se acelera uniformemente, ya que su rapidez aumenta en proporción directa con el tiempo. ¿Cómo representaría un movimiento uniformemente desacelerado?

El movimiento de un paracaidista


Habrás visto en películas o en la televisión que para disminuir la rapidez con la que cae una persona que se lanza desde un avión se sitúa en posición horizontal, mirando hacia abajo y 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 fácilmente y sin peligro aterrizar en el suelo.

ACTIVIDAD

 Dibuje los movimientos del paracaidista en el espacio de eventos (x, t) y en (v, t) . Ubique el evento correspondiente a la apertura del paracaídas.

ACTIVIDAD

 Observe el movimiento de una pelota de hule que se sumerge en una pila de agua. Dibuje las gráficas (x, t) y (v, t) correspondientes a este movimiento.

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? ¿O bien sobre la superficie de la Tierra, cuando de pronto el aire desaparece por alguna razón desconocida? ¿Habría una velocidad terminal?

En la historia de la ciencia se registran varias respuestas para el 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 que genera vacío en espacios cerrados, desarrollada en 1650 por Otto von Guericke (1602-1686).

No se sabe con certeza si el movimiento de objetos sobre la superficie de la Tierra era un problema que les importaba. Aunque la evidencia indirecta, como el diseño del *átlatl* que antes se presentó, demuestra que el movimiento de lanzas sí era un problema importante. Otro ejemplo es el movimiento de piedras lanzadas a mano o por hondas; de hecho, el paso de la mano a la honda es una muestra de la existencia de una pregunta y de una respuesta.

Es una fortuna contar con el registro escrito de algunos pensadores griegos, como Aristóteles (384-322 a.C.), quien en un libro titulado *Física* y en otros, trató el problema del cambio y el movimiento. El modo de pensar de Aristóteles consiste en la observación de hechos de la naturaleza empleando sólo los sentidos, tratando de explicarlos con suposiciones. La conjunción de suposiciones y hechos forman una representación o modelo de la naturaleza.

A partir de las suposiciones se explican los hechos observados y otros que no han sido observados. En este último caso se habla de las predicciones del modelo. De éste se desprenden, mediante las leyes de la lógica, una serie de consecuencias que explican lo observado, o que predicen algún comportamiento del objeto no observado hasta entonces. Estas predicciones pueden encontrarse en las futuras observaciones del objeto de estudio, que no es otro en el presente caso que el movimiento de los objetos sobre la superficie de la Tierra.

Si las predicciones del modelo concuerdan con lo observado, hablamos de una corroboración o contrastación positiva del modelo. Si el objeto no se comporta como predice la teoría, entonces se tiene una contrastación negativa o falta de acuerdo entre el modelo teórico y el comportamiento experimental del objeto. En este caso habrá que desechar el modelo o modificar alguna de sus suposiciones, o comprobar si las observaciones han sido realizadas correctamente.

A continuación se presenta el modelo de Aristóteles sobre el movimiento de los objetos, en particular para la caída libre de objetos sobre la superficie de la Tierra.


Si se observa el movimiento de los objetos que lo rodean, se aprecia que unos objetos se mueven porque otros los empujan o los jalan, como cuando se lanza una pelota o una piedra, o con su mano acerca a un compañero, tomándole de la camisa. Estas acciones se pueden ejecutar porque, siendo un ser vivo, está en capacidad de imprimir movimiento a otros seres, vivos o inertes. Pero observe con cuidado: ¿empuja alguien el aire, convirtiéndolo en viento? Si se quema papel o hierve agua: ¿qué hace que el humo o el vapor suban?

En culturas antiguas se pensaba que los objetos, como el viento o la lluvia, eran ocasionados por agentes invisibles o dioses. Éstos tenían que existir, pues todo movimiento fuera de piedras, humo, aire, agua, debería ser provocado por alguien que los lanzara o jalara. El viento era aire empujado, la lluvia agua lanzada desde arriba, los truenos fuego arrojado desde el cielo, etcétera.

¿Qué pensaría de otros movimientos, como el del agua en los ríos, la flama de una hoguera, el movimiento del Sol, la Luna, las estrellas fugaces? ¿Supondría que alguien o algo los mueve?

Entre los aztecas, por ejemplo, se suponía que el viento era producido por un dios llamado Ehécatl, y que la lluvia por otro llamado Tláloc. Estas creencias estaban encaminadas a la explicación del fenómeno o de los hechos del movimiento de objetos, basadas en la suposición de que un agente externo los provocaba.

ACTIVIDAD

 Investigue y discuta los modelos que algunos miembros de su familia o compañeros tienen para explicar el viento, la lluvia, los ríos, los meteoritos, el movimiento del Sol, la Luna y las estrellas en el firmamento.

Al conjunto formado por los objetos en observación, los hechos o movimientos que manifiestan y las suposiciones sobre los agentes que los provocan se les llama *representación o modelo*.

¿Por qué piensa que desde tiempos inmemoriales los seres humanos han modelado partes de la naturaleza?

En la Grecia clásica, Aristóteles dejó por escrito sus reflexiones acerca del cambio y el movimiento de un conjunto muy grande de objetos, animados e inanimados.

El modelo desarrollado por Aristóteles difiere del de los aztecas y de otros del mismo tipo: no supone la acción de ningún agente externo para explicar el movimiento natural de los objetos;

todos los movimientos son debidos a agentes o causas naturales.

En particular, se interesó en describir y explicar el movimiento de los objetos comunes del mundo circundante, tal y como se percibe con los sentidos. Entre ellos se puede mencionar el lanzamiento de piedras, lanzas y flechas, el vapor de agua, el viento, las llamas, la lluvia, etc. Son ejemplos de movimientos de objetos en la superficie de la Tierra. Sin embargo, también mostró interés por estudiar el movimiento de los cuerpos celestes, apoyando la propuesta de Ptolomeo, en la cual la Tierra estaba situada en el centro del Universo (modelo geocéntrico) con el Sol y los planetas girando en torno a ella.

Aristóteles trató de explicar estos movimientos mediante una sola suposición: todos los objetos tienden a moverse hacia su lugar natural. De acuerdo con Aristóteles, hay distintos lugares naturales según sea la composición de los objetos. Todos los objetos están formados de cuatro elementos básicos o fundamentales: tierra, agua, aire y fuego.

La tierra tiene como lugar natural el centro de la Tierra. Por eso nuestro planeta asume la forma que tiene, pues si sus partes se van aglomerando tendiendo hacia su centro, no puede tener otra forma más que la esférica.

Si a los objetos terrosos —como una piedra— se los suelta de la mano, inmediatamente tenderán a caer hacia su lugar natural, el suelo. Pero, ¿qué sucede cuando a una piedra se la lanza hacia arriba? ¿Por qué se mueve en sentido contrario de donde está su lugar natural?

Aristóteles supuso que si la piedra se lanza hacia arriba estará dotada de un impulso proveniente del aire detrás de ella, ocasionado por la mano, y que desaparecerá en el momento en que el movimiento del aire detrás de la piedra se desvanezca. La piedra irremediablemente caerá hacia su sitio natural. Es claro que para explicar el movimiento de la piedra hacia arriba, Aristóteles tuvo que modificar su modelo original.

Del modelo aristotélico se pueden explicar algunos fenómenos, como por ejemplo el peso de los objetos. El peso no es más que una manifestación de la intensidad de la tendencia hacia el lugar natural del objeto. Por eso, objetos diferentes, al sostenerlos con la mano, muestran tendencias distintas hacia su lugar natural, unas mayores que otras; una pluma de ave se siente más ligera que una piedra.

¿Qué siente si sostiene con la mano dos piedras de la misma constitución, una pequeña y otra grande? ¿En cuál siente que es mayor la tendencia hacia su lugar natural, el suelo?

¿Cree, como decía Aristóteles, aparentemente sin hacer el experimento, que al soltarlas simultáneamente, la más pesada caerá primero al suelo que la menos pesada?

¿Cómo se imagina que habría explicado Aristóteles el experimento en que primero se deja caer el filtro de café y, en seguida, se observa su caída hecho bola?

Se verán ahora con más detalle otras explicaciones aristotélicas:

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


El aire, siendo más ligero que la tierra y que el agua, tiende a ir hacia arriba de ellas, terminando por acumularse por encima del agua y de la tierra, en la atmósfera. Por eso también las burbujas de aire en agua tienen un movimiento ascendente.

El fuego, siendo más ligero que los tres elementos anteriores, tiende a elevarse hacia la parte superior de la esfera del aire; es decir, se situará en el extremo superior de la atmósfera. Ésa es la razón de que las llamas apunten hacia arriba.

El modelo de Aristóteles consta ahora de objetos compuestos de combinaciones de los cuatro elementos y que se mueven hacia sus lugares naturales en un mundo organizado así: primero tenemos la esfera de la Tierra, a la que 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.

Volviendo al movimiento de una piedra que es lanzada por la mano, Aristóteles decía que el impulso dado a la piedra se transmitía al aire y

ACTIVIDAD

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

que éste transportaba la piedra a lo largo de su trayectoria. Sin embargo, conforme el impulso se transmitía punto a punto en el aire, se iba debilitando, de manera que el movimiento natural de la piedra se iba haciendo cada vez más dominante. El movimiento hacia arriba disminuía, eventualmente transformándose en un movimiento hacia abajo, hasta que la piedra quedaba de nuevo finalmente 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 (“todo lo que sube, debe bajar”).

Entonces, el movimiento forzado (que va contra el movimiento natural) inevitablemente debe dar paso al movimiento natural y éste conducirá al objeto a su lugar natural. Una vez aquí, puesto que no hay otro lugar a donde ir, la piedra quedará inmóvil.

Para Aristóteles el movimiento es un proceso que, inevitablemente, termina en el reposo o en la ausencia de movimiento.

El punto de vista griego del movimiento fue una teoría física elaborada por una de las mentes más grandes que han existido en la historia de la humanidad. El modelo parecía predecir y explicar tantas cosas, que fue aceptado por grandes estudiosos durante los dos mil años siguientes.


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 esta misma gente terminó aceptando que era “incorrecta”?

Las dudas sobre una teoría empiezan a surgir cuando se detectan contradicciones internas. Con esto se quiere decir que de ella se pueden deducir dos conclusiones que son 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 en la 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 y 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?

ACTIVIDAD

 En el patio de la escuela deje caer dos piedras de pesos notablemente diferentes. Meta ahora las dos piedras firmemente apretadas dentro de una bolsa y déjalas caer.

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 no sólo distintas sino contradictorias, surgidas del mismo modelo. Parece que las dos tuvieran razón. De la observación, ¿estaría de acuerdo con alguna de las dos predicciones? ¿Se le ocurren argumentos que invaliden la contradicción?

Lo cierto es que los defensores de la teoría aristotélica encontraron argumentos para contrarrestar las contradicciones. Así, este modelo sobrevivió muchos años.

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 presión de la piedra de menor peso. Esto quiere decir, de acuerdo con el 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 rápidamente que la de menor peso? Si esto no sucede, entonces la teoría del movimiento tendrá 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 del filtro de café, primero en forma original y luego hecho pelota? ¿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 del filtro, 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 otros aspectos experimentales fueron Arquímedes (287 a.C-212 a.C.) y Herón (quien vivió en el siglo I de nuestra era).

Sin embargo, en el Renacimiento, los experimentalistas empezaron a cobrar importancia, sobresaliendo de entre ellos Galileo (1564-1642).

El modelo de Aristóteles fue discutido y criticado desde su aparición. La discusión se prolongó en Europa, cuando sus teorías fueron llevadas a ese continente por los árabes. Pero su influencia fue enorme, duró dos milenios, hasta que otra forma de pensamiento, que condujo a otras suposiciones o hipótesis sobre el movimiento de caída libre de los cuerpos, empezó paulatinamente a imponerse.

El nuevo pensamiento, desarrollado a partir del Renacimiento europeo, se basó en la necesidad de la experimentación. Es decir, se trataba de la observación del comportamiento de los objetos de forma planeada y con ciertas condiciones de control.

La experimentación sobre el movimiento implicaba la medición de lo observado, lo que marcaba una gran diferencia con el método aristotélico, basado en la descripción cualitativa. 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.

Galileo realizó experimentos concretos, dejando caer objetos con ciertas condiciones de control, como el que describe en uno de sus libros sobre el rodamiento de un balón en un canal inclinado de madera, forrado de cuero pulido. (Vale la pena señalar que diversos científicos de su época, como Marin Mersenne y otros de tiempos posteriores, ponen en duda que el científico italiano haya realizado los experimentos que describe en sus textos.)

Galileo hace también experimentos pensados, es decir, realizados mentalmente. Estos experimentos se refieren, en general, a situaciones inalcanzables, 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* (como les llamó a los objetos que son atraídos hacia el centro de la Tierra), Galileo manejó conceptos, hipótesis y métodos muy alejados de los propuestos por Aristóteles. Para empezar, no trató de hallar la causa por la que los objetos caen a la Tierra una vez que se les suelta.

Galileo supuso que, en el vacío, todos los cuerpos caen con la misma rapidez hacia el centro de la Tierra. Y que si se les deja caer al mismo tiempo desde la misma altura, llegarán al suelo simultáneamente, en franca contraposición con Aristóteles. Galileo supuso la existencia del vacío y que la rapidez no era proporcional al peso.

Ideó así un experimento en el que piedras de pesos diferentes se sueltan desde la misma altura y caen prácticamente al mismo tiempo, esto es, casi con igual rapidez. Si las piedras fueran, por ejemplo, de un kilogramo y cinco kilogramos, de acuerdo con Aristóteles la más pesada caería cinco veces más rápido que la otra, hecho que evidentemente no se observa. Lo anterior quiere decir que en el vacío, bolas de madera, metal, plumas de ave, etc., llegarían al mismo tiempo al suelo.

Pero Galileo pudo descubrir la forma del 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 estancado 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).

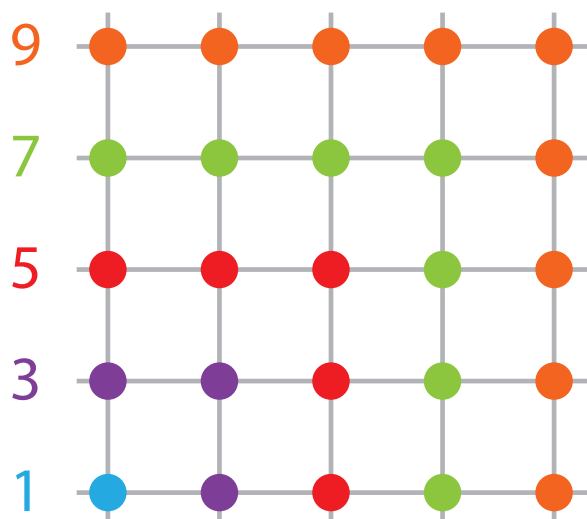
El movimiento de caída libre es uniformemente acelerado, en el que la distancia y el tiempo de caída se relacionan de una manera muy especial. Galileo lo expresó con la siguiente frase, un tanto oscura, en una carta dirigida a un colega veneciano el 16 de octubre de 1604: “Los espacios atravesados por 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 el famoso físico? Para descubrirlo, observe la figura 49: entre un elemento de la serie y el siguiente transcurre un intervalo igual de tiempo. La distancia recorrida es proporcional a la cantidad de puntos de cada cuadrado. Cada cuadrado se construye sumando al anterior un número de la serie de los impares, empezando por la unidad (*ab unitate*, dice Galileo en latín). Y esto es lo sorprendente: que la relación

entre distancias y tiempos de caída se ajusta exactamente a la descripción geométrica pitagórica. Galileo expresaba esto diciendo que “el lenguaje de la naturaleza es la geometría”.

De este modo, Galileo propuso un método o procedimiento para acercarse a las verdades de la naturaleza: observar el fenómeno en cuestión (como el movimiento vertical de 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), derivar una consecuencia de la hipótesis o predicción (que la distancia recorrida cambia como en la figura anterior), someter la hipótesis y sus consecuencias a la prueba experimental.

Figura 49 | Serie pitagórica de construcción de los cuadrados, sumando los impares en sucesión.




Como se vio, 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. Cuál de las dos hipótesis es la verdadera, es una pregunta que la naturaleza responde. De acuerdo con el nuevo método, el científico se pregunta mediante un experimento bien pensado y controlado, tomando medidas cuantitativas y no sólo con argumentos cualitativos, y la respuesta la da la naturaleza, así que ésta tiene la última palabra.

Al hacer el experimento, seguramente Galileo se dio cuenta de que el tiempo de caída vertical era demasiado rápido como para medirlo con el pulso de su corazón o algún otro procedimiento conocido. Entonces intentó modificar las condiciones de control para que el tiempo de caída disminuyera, sin cambiar por ello la esencia del fenómeno.

Fue así como concibió el experimento en el cual balines de pesos diferentes se dejaban caer por un canal situado en un plano inclinado. En su descripción del experimento, él afirma que el tiempo de recorrido del balín sobre el canal lo medía cuantificando el agua que salía de un recipiente. Con ese reloj de agua, Galileo comprobó la predicción de su hipótesis: que la rapidez de caída variaba directamente con el tiempo.

Como antes se mencionó, su colega Mersenne cuestionó la factibilidad del experimento; en particular, dudaba que por medio del reloj de agua pudiera medir los intervalos de tiempo de caída del balín. ¿Cree que Mersenne tenía razón en su crítica? Para responder, realice la siguiente actividad:

ACTIVIDAD

 Trabajando en equipo con sus alumnos, 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.

Notará, sin embargo, que primero es necesario responder a la siguiente pregunta: ¿por qué el movimiento del balín sobre el canal es análogo al de la caída vertical?

¿Cómo es el movimiento cuando la velocidad cambia? La aceleración

Todo el tiempo estamos en presencia de cuerpos en movimiento: se mueve el aire, las hojas y las ramas de los árboles, el agua de los ríos, los animales, las personas, los automóviles, los aviones, etc. En general, los cuerpos en movimiento siguen diferentes trayectorias y sus velocidades sufren variaciones.

Ya se estudió el movimiento rectilíneo uniforme, ahora se estudiará el movimiento de un cuerpo cuya velocidad cambia (actividad p. 52).

En diversos ámbitos se usa la palabra *aceleración*. Así, por ejemplo, en Química se habla de acelerar una reacción química cuando se hace referencia a que se realice en menor tiempo; con relación al cambio climático, se habla de que se está acelerando el deshielo de los glaciares; en Economía se habla de aceleraciones y desaceleraciones para referirse a variaciones en la velocidad de crecimiento de algunos indicadores económicos de los países.

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 balón 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 en intervalos de tiempo iguales. Se usan para estudiar el movimiento de algunos cuerpos.

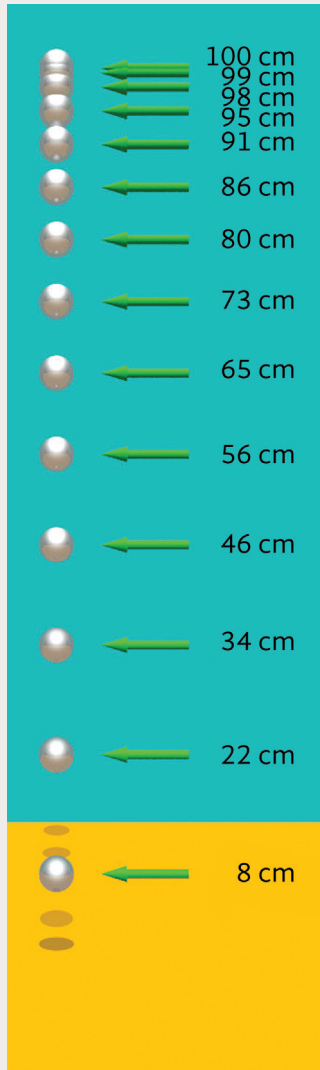


Figura 50 | Fotografía de exposición múltiple de un balón en caída libre.

Después de soltar el balón (desde la posición 0 m), 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 parte derecha de la fotografía se presenta una escala graduada en centímetros, en la cual se puede leer la posición del balón.

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

Se sabe que la rapidez media es $\frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$:

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

Dado que los intervalos de tiempo Δt son iguales, puede ver en la fórmula anterior que el tamaño de la rapidez media depende sólo del tamaño de Δx en cada intervalo.

Dos posiciones consecutivas del balón en la fotografía nos 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 balón, 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"; entonces un "tic" es igual a $1/30$ segundos. Se dan datos a partir del tic número 4 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

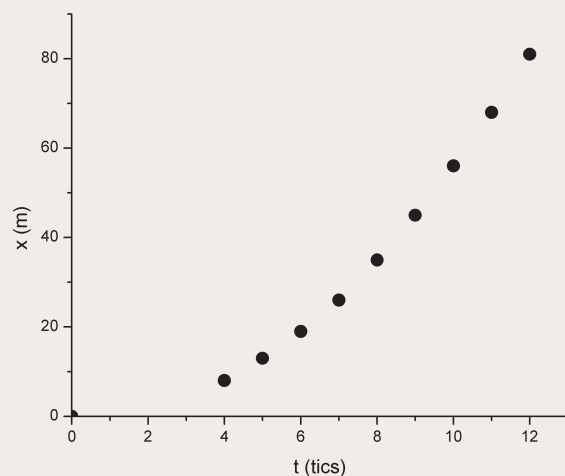


Figura 51

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			-	-
	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 balón en caída libre para cada intervalo de tiempo, y con estos datos puede construir la siguiente tabla de " t " vs " v_m ".

$t(\text{tic})$	$v_m(\text{cm/tic})$
0	
	—
1	
	—
2	
	—
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; y 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 balón con el tiempo. La primera información que se obtiene de la gráfica es que la rapidez inicial del balón 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 $t = 6$?, y ¿entre $t = 8$ y $t = 9$? ¿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

$$v_f - v_i = \Delta v = 7.$$

La figura 52 muestra el cambio en la rapidez para el intervalo de tiempo considerado.

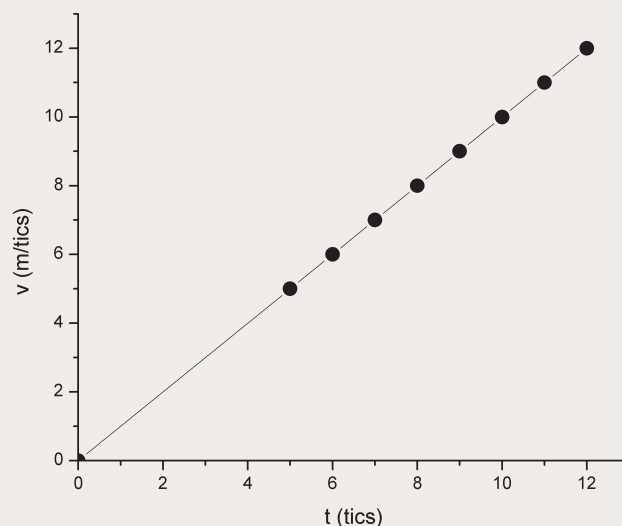


Figura 52

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 cae el balón (1.16 cm/tic²) 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/s².

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 es el que se define en física 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 media a_m , se expresa como:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

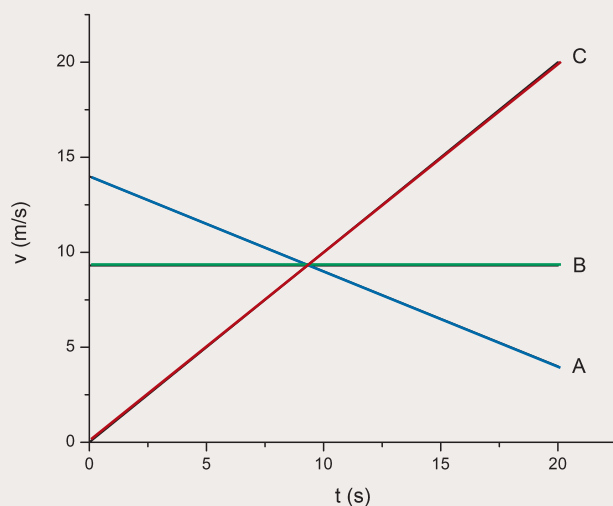
Las unidades para la aceleración, en el Sistema Internacional de Unidades son, por supuesto, unidades de velocidad entre unidades de tiempo; esto es:

$$\text{m/s/s} = \text{m/s}^2.$$

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

ACTIVIDAD

Observe la gráfica "v en función de t" relativa a tres cuerpos en movimiento denominados A, B y C.



Conteste las siguientes preguntas:

- ¿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?

Figura 53

El cambio como resultado de las interacciones entre objetos. Interacciones entre objetos: cambios de posición y de velocidad

En el bloque anterior se estudió el movimiento de algunos objetos. Si se fija con detenimiento en un objeto en particular percibirá que 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?
 - a) Ponga ahora el libro en la mesa. ¿Con qué objetos interactúa ahora el libro?
 - b) Describa las interacciones del libro cuando se pone sobre una cama elástica (o brincolín) y cuando lo sitúa encima de un resorte.

2. 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.

<i>Objeto observado</i>	<i>En reposo o movimiento</i>	<i>Objeto u objetos causantes del reposo o del movimiento del objeto observado</i>
Libro sobre su mano	Reposo	
Pelota de futbol en el aire	Movimiento	
•	•	•
•	•	•
•	•	•

Interacciones por contacto

En un partido de futbol el balón se mueve porque alguien lo ha golpeado, o porque algún jugador ha hecho un saque de banda lanzándolo con las manos. En ambos 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.

Al patear el balón, éste se deforma por el impacto del pie. Cuándo espera que el balón se deforme más: ¿si le da un puntapié un niño o un adulto? ¿Cuál de los dos ejerce una mayor interacción de contacto?

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 cam-

Figura 54



bio en la rapidez y en la dirección de su movimiento. Por ejemplo, en un tiro de esquina el guardameta salta, le pega con el puño al esférico y trata de mandarlo con la máxima rapidez posible en un sentido que lo aleja de la portería para disminuir el peligro de gol.


ACTIVIDAD

 Describa sus sensaciones cuando atrapa con sus manos o en su regazo el balón que le envía un compañero.

Interacciones a distancia


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

ACTIVIDAD

 En la tabla que hizo anteriormente (p. 56) agregue una columna a la derecha con el título “Tipo de la interacción”; en el renglón correspondiente escriba si la interacción es de 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 papeletos, atrayéndolos.

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 papeletos? ¿La interacción entre ellos es por contacto o a distancia?

ACTIVIDAD

-  1. Sostenga en su mano un balón y en seguida déjelo caer.
- ¿Qué le pasa al estado de reposo inicial del balón?
 - ¿Con qué objeto interactúa el balón para que esto suceda; es decir, para que parta de una velocidad cero a una que crece uniformemente con el tiempo?
2. Si ahora lanza verticalmente hacia arriba el balón:
- ¿Qué le sucede después de que deja su mano?
 - Describa el movimiento del balón en una gráfica (x, t) , con la que ya está familiarizado. ¿Con qué objetos interactúa en los siguientes casos?

a) Cuando aún está en su mano.	c) Mientras está en el aire.
b) En el momento en que deja de tocar su mano.	d) Cuando llega al suelo.
3. Vuelva ahora al experimento en que sitúa un libro encima de diferentes objetos: su mano, una mesa, un resorte y una cama elástica. Identifique en cada caso los objetos con que el libro interactúa y describa el tipo de interacción con cada uno de ellos, especificando si es por contacto o a distancia.
4. Describa las interacciones del libro cuando está en el suelo. ¿Con qué objetos interactúa ahora?
- Imagine que efectúa las experiencias anteriores dentro de un cuarto al que se le ha extraído completamente el aire: ¿cambiarían sus respuestas?

A la interacción entre cualquier objeto con la Tierra se la denomina *gravitatoria*.
 ¿Ha observado que la Luna se mueve? ¿Con qué cree que interactúa? Si cree que existe una interacción, ¿de qué tipo sería?

ACTIVIDAD

👉 Tome dos imanes de barra, únalos y márkelos con etiquetas azules y rojas como se ve en la figura 56.

1. 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 perciba, por la sensación en sus manos, el cambio en la intensidad de la interacción.
 - b) Repita la operación girando uno de ellos 180 grados, es decir, que la marca roja de uno coincida con la roja del otro.
 - ¿Qué cambios nota en ambos casos?

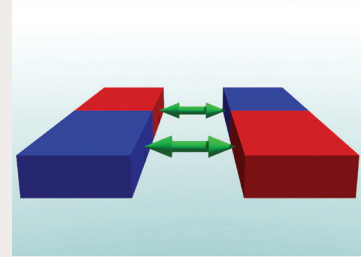


Figura 55

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 muévelo de un lado a otro. ¿Qué sucede?

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

3. Escriba de qué tipo cree que son las interacciones gravitatoria, eléctrica y magnética: por contacto o a distancia.

La idea cotidiana de fuerza

Empuje o jale a un compañero, sin que llegue a lastimarlo: ¿De qué manera describe la acción? ¿Usa o ha oído usar la frase: “Ejercí una fuerza sobre mi compañero”, o bien, “Lo empujé con fuerza”?

¿Cómo llama usted a una persona que puede levantar grandes pesos, lanzar muy alto un objeto, empujar o jalar cuerpos muy pesados?

¿Qué propiedad dice que tiene una persona que es capaz de mover objetos de gran peso de un lugar para otro, o cambiar su estado de reposo a otro de movimiento?

¿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?, ¿o que pueden lanzar objetos pesados a mayor distancia que otros individuos?

¿Qué efectos puede ocasionar una fuerza aplicada por un objeto sobre otros objetos?

ACTIVIDAD

👉 Haga una clasificación de sus amigos, conforme a la capacidad anterior y compárela con la clasificación que hayan hecho sus otros amigos. ¿Coinciden?

En caso de que las clasificaciones no coincidan, ¿a qué prueba puede someter a sus amigos para que queden clasificados correctamente en términos de los que sí tienen dicha capacidad?

Se dijo 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, etcétera).

Sin embargo, en física, la fuerza siempre es una interacción entre dos o más objetos. ¿Qué se quiere decir con esto?

La “fuerza de una persona” se manifiesta por los cambios que produce en otro objeto. Se habla entonces de la fuerza que dicha persona ejerce sobre un objeto al interactuar con él. Al decir “tal persona tiene gran fuerza”, lo que en realidad se está afirmando es que si dicha persona interactúa con otro objeto, le producirá cambios sustanciales, ya sea por el cambio en su movimiento o deformándolo.

Entonces, la fuerza es un concepto que siempre requiere de al menos dos objetos para que se manifieste. La fuerza no es “algo” que contenga un objeto, aunque éste sea un ser vivo.

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.

ACTIVIDAD

Si abraza a un compañero, aplicándole una fuerza en su abdomen mediante una “llave de candado”, ¿qué siente en sus brazos? ¿Qué siente cuando se la aplican a usted?

A la fuerza que le aplica a su compañero se llama *fuerza de acción*. A la fuerza que su compañero ejerce sobre sus brazos se llama *fuerza de reacción*.

Si tiene duda sobre la existencia de la fuerza de reacción, abraze un objeto no tan blando como un compañero, por ejemplo, una columna de cemento.

Observe con atención que la fuerza de acción se ejerce sobre la columna o sobre su compañero, pero la fuerza de reacción es sobre sus brazos.

La fuerza de acción y su reacción van siempre juntas, aunque se aplican en objetos distintos, que son los que interactúan.

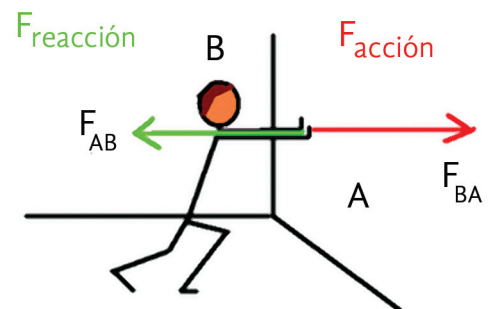
Enliste las fuerzas de acción y reacción en los casos siguientes: libro sobre su mano, libro sobre una mesa, libro sobre el suelo, un balón al patearlo.

Se analizarán los términos “fuerza de acción” y “fuerza de reacción”, de la actividad anterior.

Si siente en sus brazos un efecto al apretar el abdomen de su compañero, entonces con toda propiedad también se puede llamar “fuerza de acción” a la fuerza que su abdomen ejerce sobre sus brazos. ¿Está de acuerdo? Por lo mismo, la fuerza que ejerce con sus brazos sobre su compañero sería llamada ahora “fuerza de 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”. Y lo mismo vale para la fuerza que B ejerce sobre A; es decir, si se empieza afirmando que la fuerza que A ejerce sobre B es la “fuerza de acción”, entonces la fuerza que B ejerce sobre A será una “fuerza de reacción”, y viceversa. Ambas fuerzas vienen siempre en pares.

Figura 56



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.

Si levanta un libro del suelo está aplicando una fuerza sobre él, ¿cierto? Con la aplicación de la fuerza de su mano sobre el libro ha logrado cambiar su posición, desde el suelo hasta una cierta altura, es decir, de una situación de reposo, a otra situación 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?

Recuerde que para que se pueda hablar de una fuerza se necesita de dos objetos: el que ejerce la acción y sobre el que se ejerce. En la vida cotidiana la palabra “fuerza” se emplea en diversos contextos y con diversos significados, diferentes al significado que se usa en física.

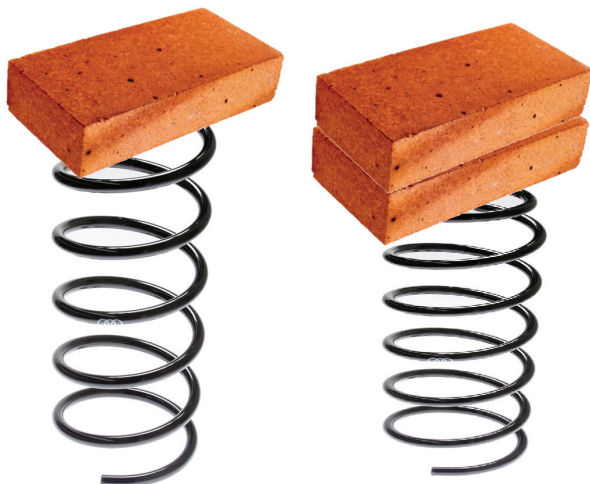
LA EXPLICACIÓN DEL CAMBIO DE VELOCIDAD: EL CONCEPTO DE FUERZA**El concepto de fuerza: el resultado de las interacciones**

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

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

Un ejemplo ilustrativo del caso c) se muestra en la figura 58: un resorte se comprime al ponerle encima un objeto pesado, y se comprime el doble al ponerle encima otro objeto más, del mismo peso que el anterior.

Figura 57



En ambos 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 del tabique. 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 les 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 o plástica.

ACTIVIDAD

👉 Llene una lata de refresco de 355 ml con agua. Vacíe el agua en un recipiente transparente y marque con un plumón hasta dónde llega el agua. A continuación divida esta marca en cuatro partes iguales. Cuelgue ahora la lata vacía usando una liga. Mida la longitud de la liga. 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, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1). ¿Qué tipo de gráfica obtiene? Notará que la deformación es proporcional al esfuerzo.

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

ACTIVIDAD

👉 Con los siguientes materiales —resortes, ligas, papel, regla y una jeringa— diseñe aparatos que midan el peso de objetos, el empuje y el jalón que pueda dar con su mano.

¿Puede, ahora sí, cuantificar lo “forzudos” que son sus amigos con su invento para medir fuerzas?

Por cierto, a un aparato que mide fuerzas se le llama *dinamómetro*, porque en griego la palabra *dynamos* significa fuerza.

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

El estado de reposo y el de movimiento están siempre relacionados a un *marco o sistema de referencia*, que sirve para identificar las posiciones de los objetos y sus cambios; es decir, permite cuantificar su movimiento. El marco cartesiano de referencia tridimensional consiste en tres líneas mutuamente perpendiculares, como se ve en la figura 58.

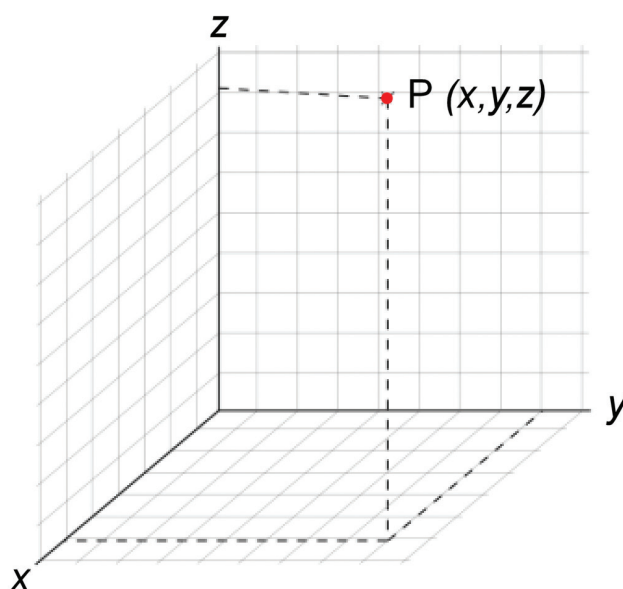



Figura 58 | Marco de referencia cartesiano y especificación de un punto P mediante la terna de números x, y, z .

La localización de un 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 varillas de madera, aproximadamente del tamaño de un lápiz, de modo que se unan perpendicularmente en un punto, el cual será el origen. Cada varilla es un eje cartesiano, que puede designarse por las letras X, Y, Z, respectivamente. El sistema puede viajar con usted a cualquier parte y hacerlo coincidir con referentes, como los siguientes.

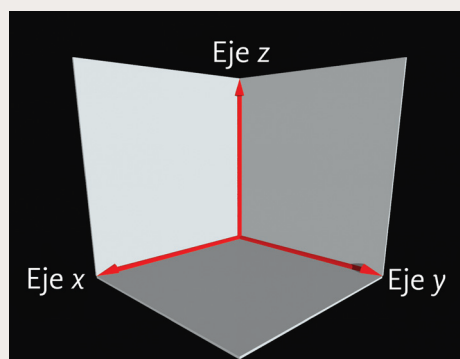



Figura 59 | Marco cartesiano de referencia en un cuarto.

Ubique el origen del marco cartesiano de referencia en una de las esquinas que forman las 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 las paredes, como en la figura.

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.

ACTIVIDAD

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

Si afirma que un objeto —por ejemplo, una silla del salón— está en reposo, eso significa que su posición no cambia en el tiempo con respecto a usted ni con respecto al suelo. Siempre la verá en el mismo lugar. Pero si usted se mueve, ¿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 distinto, su estado de movimiento

ha cambiado, pero no porque se le haya aplicado una fuerza, sino debido a que el sistema de referencia se movió.

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 con relación al suelo. Pero si quita la mano, el libro cambiará de estado de movimiento, acelerándose hacia el suelo en sentido perpendicular a éste. ¿Por qué estaba originalmente en reposo? Porque dos fuerzas contrapuestas e iguales actuaban sobre el libro: por un lado, la fuerza de la atracción de la Tierra y, por el otro, la fuerza de su mano actuando en sentido contrario. No hay ninguna *fuerza neta* o *efectiva* que quede desbalanceada. Si quita la mano, queda sin compensar la fuerza de atracción de la Tierra, por lo que el libro cambia su estado del reposo a uno con aceleración constante.

Es decir, cuando se afirma que una fuerza aplicada sobre un objeto le ocasiona cambios en su velocidad, actúa sobre el cuerpo una fuerza neta no balanceada. Observe que la acción de más de una fuerza puede ocasionar un movimiento a velocidad constante o de reposo.

Recapacite: ¿qué fuerzas actúan sobre el libro para mantenerlo quieto?; y, ¿qué fuerzas actúan sobre el libro si se mueve con aceleración constante hacia el suelo?

Ahora piense en este otro caso, que también ya conoce: la caída del filtro de café. ¿Por qué cae con velocidad constante? ¿Cuáles son las fuerzas que actúan sobre el filtro, de modo que la fuerza neta es cero? ¿Nota 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)?

Para poder representar a la fuerza con un dibujo, considere el caso cuando empuja a su amigo: la fuerza del empujón 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 el empujón no se efectúa para cualquier parte. No es lo mismo que empuje a su amigo en una dirección o en otra.

Acuérdese que en el bloque anterior se mencionó que la dirección puede tener dos sentidos. Ahora, en el ejemplo de su amigo, está aplicando fuerzas en la misma dirección, pero en sentidos opuestos, según lo jale o lo empuje. En este ejemplo, la dirección y el sentido de la fuerza aplicada sobre su amigo coinciden con la dirección y el sentido de su movimiento. Pero se verán situaciones en que éstas no coinciden.

Como se vio, a lo 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 la que empuja a su amigo se podría representar mediante un vector del modo siguiente (fig. 60):

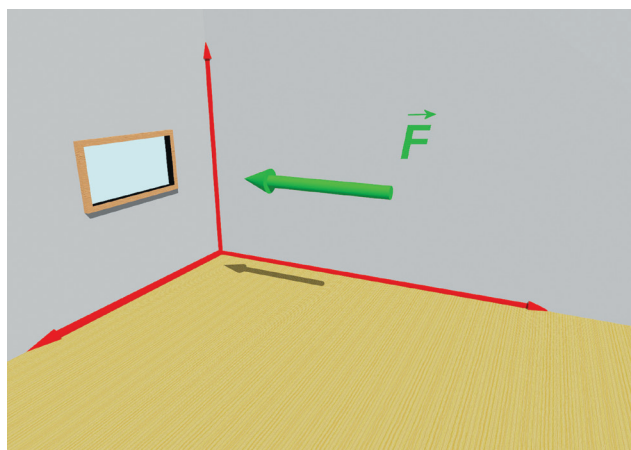



Figura 60

Una situación interesante, que ya conoce, es la de 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.

ACTIVIDAD

-  A) 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.
B) Haga lo mismo con las dos fuerzas que actúan sobre el filtro del café, cuando va cayendo a velocidad constante.

ACTIVIDAD

Si ahora otro compañero y usted empujan al mismo tiempo hacia la ventana a un tercer compañero, 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 $\vec{f}_1 + \vec{f}_2$. Por ejemplo, si usted empuja con fuerza \vec{f} y su compañero con 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.

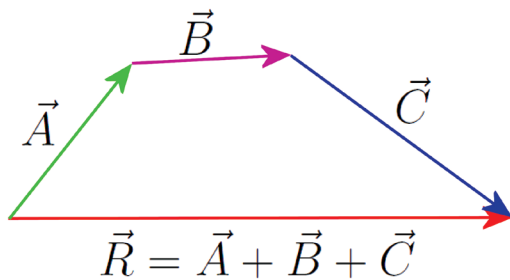


Figura 61 | Suma de varios vectores.

Pero, ¿qué sucede cuando usted empuja al compañero con una fuerza \vec{f} hacia la ventana y el otro amigo 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 (fig. 61).

ACTIVIDAD

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

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

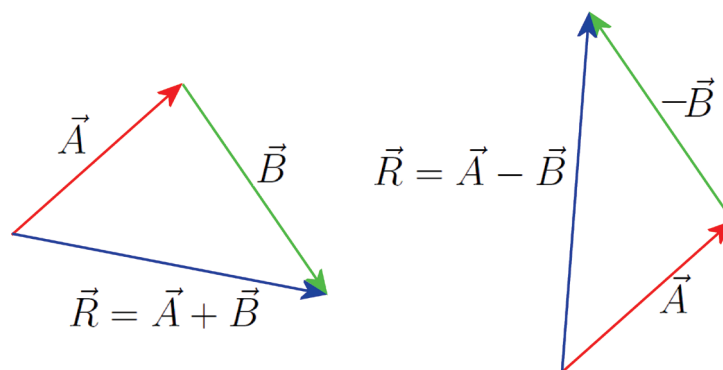


Figura 62 | Resta de vectores.

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

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 con 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 vectorial 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 63.

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

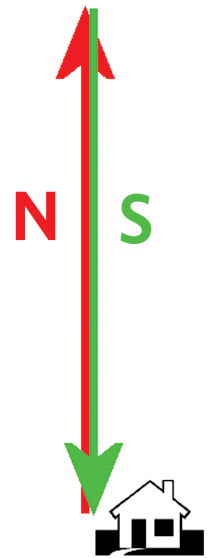


Figura 63 | Suma vectorial nula de dos desplazamientos colineales de igual tamaño, hacia el norte y hacia el sur.

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, en seguida, dos pasos hacia el sur.
6. A partir del origen desplácese ahora cuatro pasos hacia el oeste y en seguida 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. En cada caso, determine la magnitud y dirección. 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? Recuerde que la unidad de fuerza es el newton en el Sistema Internacional de Unidades.

Pues bien, todo lo dicho para el desplazamiento en la actividad anterior se puede decir para la fuerza. Imagínese 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 con que la fuerza resultante es 0 newtons?

La situación física se relaciona con el caso en el que usted y un compañero empujan a otro con la misma fuerza, pero en sentidos opuestos. Él se queda en reposo.


ACTIVIDAD

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

1. Si un compañero empuja a otro con una fuerza de 3 newtons en un sentido y, al mismo tiempo, otro compañero lo empuja con una fuerza de 4 newtons perpendicularmente. ¿Cuál es la dirección y magnitud (en newtons) de la fuerza resultante?
2. Dibuje las fuerzas que actúan sobre el 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 el sentido de la fuerza neta aplicada, y la dirección y el sentido del desplazamiento provocado.

ACTIVIDAD

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

1. 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 el eje vertical, el desplazamiento 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.
2. Haga otro dibujo para representar fuerzas, ahora en un espacio cartesiano (F_x, F_y) . En este espacio represente la fuerza con la que se empuja o empujan a un compañero al mismo tiempo. Note, en estas circunstancias, que el compañero empujado, 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?
3. Caída de un filtro para café. Dibuje el vector de desplazamiento del filtro en el espacio cartesiano (x, y) y, en el espacio de las fuerzas, dibuje nuevamente las fuerzas que actúan sobre él.
4. 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, las direcciones de los vectores desplazamiento y fuerza neta no coinciden.

Hay un tipo de fuerza muy importante que nos ayuda a entender varios de los fenómenos cotidianos. Es la fuerza de fricción y, como todas las fuerzas, es el resultado de la interacción entre dos o más objetos.

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 que se trate de caminar sobre el hielo, no sería fácil hacerlo, pues 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 que ejerce sobre ella supera a la de fricción.

Si observamos con detenimiento qué fuerzas actúan sobre una caja a la que inicialmente se le dio un impulso, se desliza en el suelo y eventualmente se detiene, se observa 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 (\vec{F}_f).

Como se ve en la figura 65, 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 verticales, de sentidos opuestos y de igual magnitud, por lo que se anulan. Por lo tanto, 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 se hace cada vez menor hasta que finalmente la caja se detiene, ¿qué sucede si se disminuye la fuerza de rozamiento, poniéndole ruedas o lubricando el piso? La caja tardará más en detenerse y, en consecuencia, recorrerá una mayor distancia. Y 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, éste 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? ¿Recuerda 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 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*.

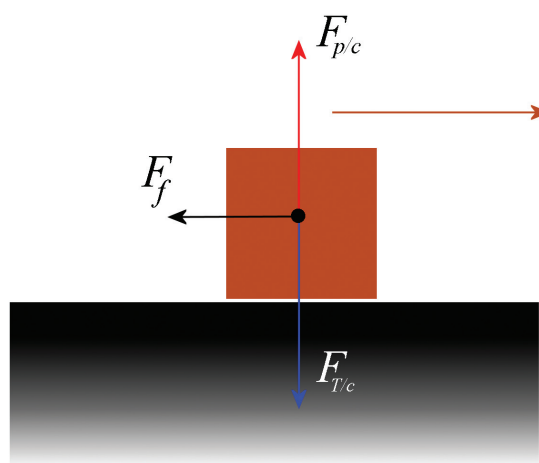


Figura 64 | Diagrama de fuerzas.

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

Si la fuerza que aplica al cajón sobrepasa la fuerza de fricción del suelo, producirá un movimiento acelerado. Cuando la fuerza que ejerce iguala a la fuerza de fricción, entonces el movimiento es a velocidad constante. Estas diferencias se pueden apreciar fácilmente con los sentidos.

Ahora realice el experimento sobre el suelo recubierto con aceite. Bastará un pequeño empujón para poner en movimiento el cajón 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 frene el cajón.

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. Se le llama mesa de aire. Una experiencia más elaborada se puede realizar colocando un disco sobre su superficie. El aire que sale por los agujeros 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 de la mesa.

Figura 65 | Mesa de aire con disco.



¿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 el disco; sin embargo, 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 con relación a 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 se mantiene constante en magnitud y dirección. Lo inverso también es válido: si un cuerpo 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*.

La relación entre masa, aceleración y fuerza

Segunda Ley de Newton

Cuando sobre un objeto actúa una fuerza neta diferente de cero, entonces la velocidad del objeto cambia; el cambio puede darse aumentando o disminuyendo su magnitud, su dirección o ambas. Podemos decir también que todo cambio en la velocidad de un objeto se debe a la acción de una fuerza no balanceada que actuó sobre él.

En la segunda mitad del siglo XVII, Isaac Newton analizó la relación entre la fuerza neta y el cambio de velocidad, que llegó a formar parte de las *Leyes del Movimiento*. Éstas 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 él 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 le 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: esa tendencia de los objetos a conservar su estado de movimiento rectilíneo o de reposo. Observó que la inercia de los objetos dependía directamente de su masa; los objetos muy masivos tienen una inercia muy grande, es decir, una gran tendencia a conservar su estado de movimiento rectilíneo 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.

Experimentando 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 la velocidad disminuye. Además, el cambio en la velocidad de un objeto varía directamente con la fuerza neta aplicada.

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

De estas dos relaciones de proporcionalidad, concluyó que:

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

Así que si se fija el valor de la fuerza neta, entonces el cambio de velocidad varía de manera inversa con la masa. Si se fija la masa y se varía la fuerza neta, entonces el cambio en la velocidad varía directamente con ésta.

Se sabe que mientras actúa la fuerza neta sobre el objeto, la velocidad cambia; por lo tanto, el cambio total en 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 :

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

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

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

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

Si en esta relación se multiplica ambos lados por m se tiene:

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

Llamando k a la constante de proporcionalidad:

$$m\Delta v = kF_{neta} \Delta t.$$

En el Sistema Internacional de Unidades (SIU), se elige $k = 1$, y por lo tanto:

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

Esta ecuación es muy parecida a la que Newton usó para relacionar a 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 .

Como todo cambio en la velocidad es un indicador de la existencia de aceleración, ésta se puede relacionar con la *fuerza neta*.

Si se divide la ecuación anterior entre Δt , queda:

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

Dado que $\Delta v / \Delta t$ es la aceleración del objeto en ese intervalo de tiempo, entonces:

$$F_{neta} = ma.$$

Nótese que si la fuerza neta es cero, la aceleración del cuerpo será nula, lo cual representa un movimiento con velocidad constante. Si la fuerza neta es diferente de cero, se tiene un movimiento acelerado.

De esta ley se concluye que, dado el movimiento de un cuerpo, se puede encontrar la fuerza que lo produce, o viceversa.

La ecuación anterior es la *Segunda Ley de Newton*. En el SIU se tiene que m se mide en kilogramos (kg), a en metros sobre segundo al cuadrado (m/s^2), y F_{neta} en newtons (N). 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 $1 m/s^2$.

La acción y la reacción

Tercera Ley de Newton

Finalmente, la *Tercera Ley de Newton* habla de la interacción entre pares de cuerpos. Si un cuerpo *A* ejerce una fuerza sobre un cuerpo *B*, entonces el cuerpo *B* ejerce simultáneamente una fuerza sobre el cuerpo *A*. Como se explicó anteriormente, 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 son de sentidos opuestos:

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

Suponga que tiene un par de fuerzas $\vec{F}_{d/g}$ y $\vec{F}_{g/d}$, ¿qué información da la figura?

- Forman un par de fuerzas.
- Se presentan de forma simultánea.
- Actúan sobre cuerpos diferentes.
- Una se llama fuerza de acción, y la otra fuerza de reacción.

Pero además proporciona más información:

- $\vec{F}_{d/g}$ y $\vec{F}_{g/d}$ actúan en sentidos opuestos.

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

- magnitud de $\vec{F}_{d/g}$ = magnitud de $\vec{F}_{g/d}$.

Esto implica 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; $\vec{F}_{d/g}$ y $\vec{F}_{g/d}$ son de igual magnitud, sólo que la aceleración \vec{a}_d es mayor que la aceleración \vec{a}_g .

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 fuerzas y movimiento de los cuerpos, conocido como la *Mecánica Newtoniana*. Esta teoría explica tanto el movimiento de los cuerpos 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.

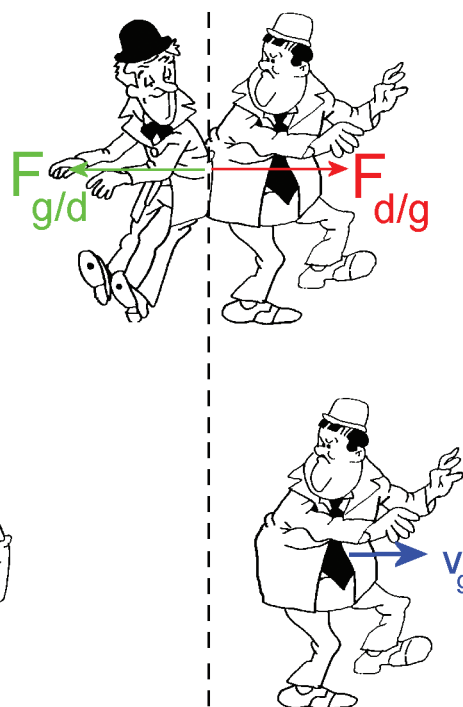


Figura 66 | Par de fuerzas.



Figura 67 | Martillo.

Las máquinas simples

Un ejemplo de ciertos dispositivos que se utilizan para transformar una fuerza en otra, que resulta útil en la vida cotidiana, son las llamadas máquinas simples.

Las primeras máquinas simples eran sencillos sistemas que facilitaron las labores del ser humano; algunas de ellas son la rueda, la palanca, las poleas, el tornillo, el plano inclinado, el torno y la cuña. La palanca y el plano inclinado son las más simples de todas ellas. En general, las máquinas simples son usadas para multiplicar la fuerza o cambiar su dirección, para facilitar el trabajo (fig. 67).

Ejemplos de máquinas simples

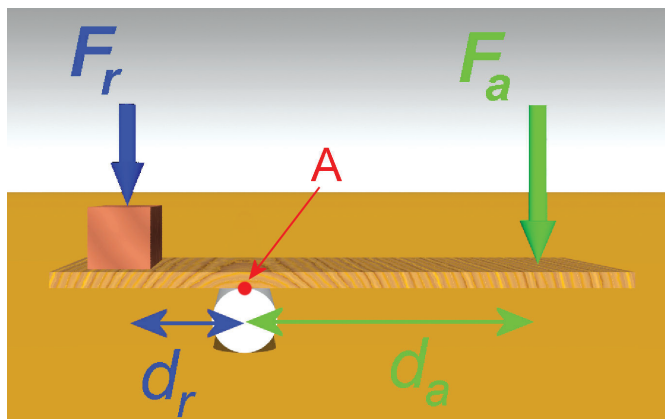


Figura 68 | Palanca.

La **palanca** es, en general, una barra rígida que puede girar alrededor de un punto fijo A, como en la figura, llamado *punto de apoyo* o *fulcro*. La fuerza que se aplica se suele denominar fuerza aplicada y la fuerza que se vence se denomina fuerza resistente o carga.

$$\vec{F}_a \times \vec{d}_a = \vec{F}_r \times \vec{d}_r$$

El funcionamiento de la palanca se basa en que, en situación de equilibrio, el producto de la fuerza resistente por su distancia al punto de apoyo debe ser igual al producto de la fuerza aplicada por su distancia al punto de apoyo, como se muestra en la figura 68.

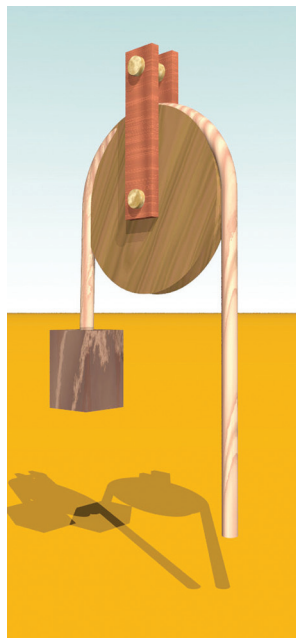


Figura 69 | Polea.

La **polea** sirve para elevar pesos. Consiste en una rueda por la que pasa una cuerda a la que en uno de sus extremos se fija la carga, que se eleva aplicando una fuerza al otro extremo de la cuerda. Su función es doble, puede obtener una fuerza mayor, aplicando una menor, o simplemente cambiar la dirección de la fuerza aplicada. Si consta de más de una rueda, la polea amplifica la fuerza. Se usa, por ejemplo, para subir objetos a los edificios o sacar agua de los pozos.

Las poleas pueden ser de diferentes tipos:

- Polea fija: está fija a una superficie y sólo cambia la dirección de la fuerza.
- Polea móvil: se mueve junto con el peso, disminuye el esfuerzo al 50 por ciento.

La **rueda** es la máquina simple más importante que se conoce. No se sabe quién y cuándo se descubrió o inventó; sin embargo, desde que el hombre utilizó la rueda la tecnología avanzó rápidamente. Se puede notar que a nuestro alrededor siempre está presente algún objeto o situación relacionada con la rueda.

El **plano inclinado** permite levantar una carga mediante una rampa o pendiente. Esta máquina simple descompone la fuerza del peso en dos componentes: la normal (que soporta el plano inclinado) y la paralela al plano (que compensa la fuerza aplicada). De esta manera, el esfuerzo necesario para levantar la carga es menor y, dependiendo de la inclinación de la rampa, la ventaja mecánica puede ser considerable.

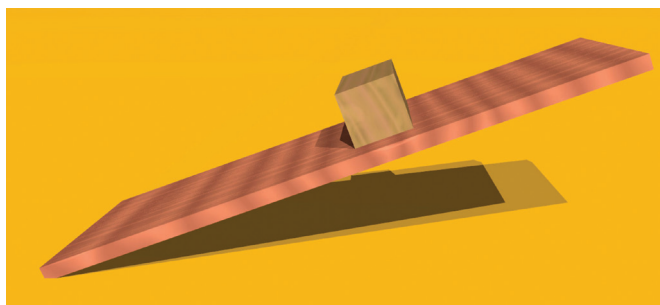


Figura 70 | Plano inclinado.

La **cuña** está formada por dos planos inclinados opuestos; se le conoce comúnmente como punta. Su función principal es introducirse en una superficie, como la flecha, hacha, navaja, desarmador, cuchillo.

La **manivela** es una máquina simple constituida por un cilindro en el que, al enredar una cuerda o cadena, se hace girar por medio de una barra rígida doblada en dos ángulos rectos opuestos; en ellos se hará un menor esfuerzo entre más grande sea el diámetro del cilindro. Ejemplos de ésta son la grúa, el pedal de bicicleta, la manija, el taladro manual.

Ley de la Gravitación Universal

A Newton 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, 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 describir una órbita circular, 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 sobre la superficie. 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 circular de la Luna?

Desde luego esta aceleración será radial, esto es, hacia el centro del círculo. Christiaan Huygens (1629-1695) la calculó. Para esto supuso un cuerpo que se encuentra en A (véase fig. 71, p. 88) y que en su movimiento describe el arco de círculo AC en un tiempo t .

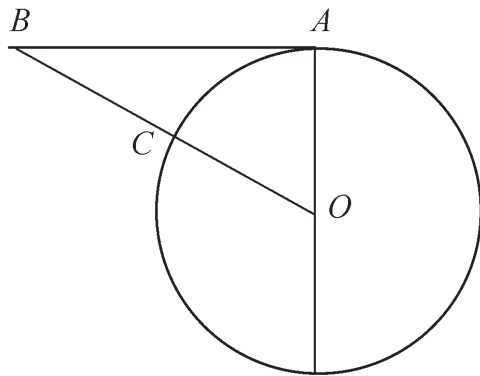


Figura 71 | “Caída” de la Luna.

Si no existiera una aceleración a , el cuerpo seguiría de A hasta B en movimiento rectilíneo uniforme, de modo que:

$$\overline{AB} = \bar{v}t.$$

Pero, por causa de dicha aceleración se produce la “caída” \overline{BC} que, de acuerdo con la *Ley de Galileo*, es:

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

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

$$\overline{OB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AB}^2.$$

Sustituyendo los valores, desarrollando los cuadrados y simplificando se obtiene,

$$\begin{aligned} (R + \frac{1}{2}at^2)^2 &= R^2 + (vt)^2, \\ R^2 + aRt^2 + \frac{1}{4}(a^2t^4) &= R^2 + (vt)^2, \\ aRt^2 + \frac{1}{4}(a^2t^4) &= v^2t^2. \end{aligned}$$

Dividiendo ahora por t^2

$$aR + \frac{1}{4}a^2t^2 = v^2.$$

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:

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

Éste es 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:

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

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 son circulares (son elipses) ni la velocidad de los planetas es constante.

El movimiento de los planetas fue un problema que interesó a varios 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 es el Sol el centro del sistema planetario, y que 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. Este eje está inclinado en un ángulo de 23.5 grados respecto a una línea perpendicular al plano de la elipse. 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.

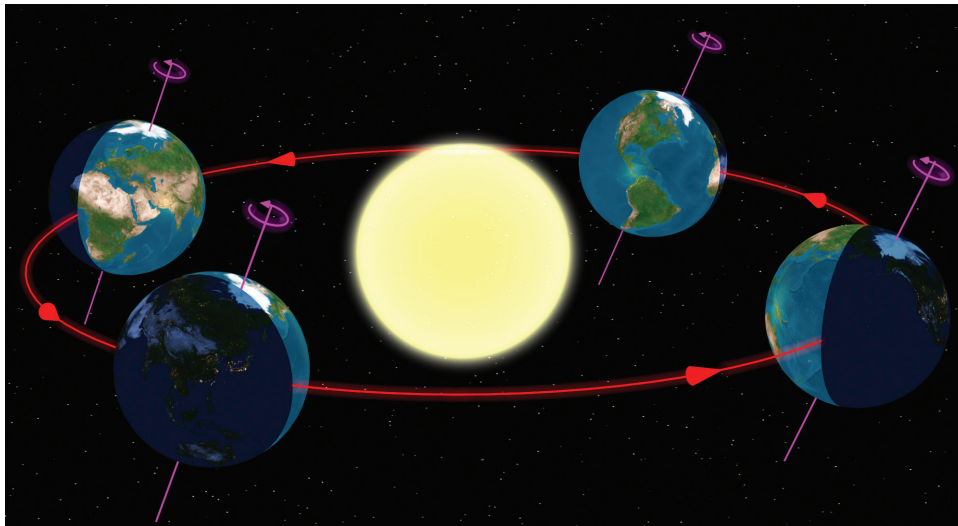


Figura 72 | Estaciones del año.

Leyes de Kepler

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 con 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 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 le llamó “carga gravitatoria”.

Newton 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 Urbain 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 estrellas.

Las fases de la Luna

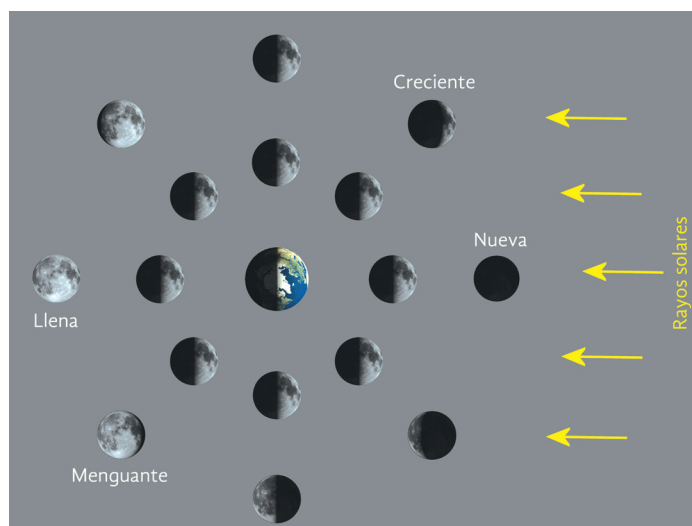


Figura 73 | Fases de la Luna.

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. Este argumento era lógico 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 (fig. 73).

El tiempo exacto entre dos lunas nuevas es de veintinueve días y medio, y este lapso recibe el nombre de Periodo o Mes Sinódico.

Año tras año, las fases de Luna se repiten con exactitud, así que en tiempos remotos sirvieron para medir el tiempo.

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, y 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; aproximadamente quince días después de la luna nueva, la parte iluminada se ha extendido totalmente hasta formar la luna llena.

Como la Luna gira alrededor de la Tierra más rápidamente que nuestro planeta 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.

Desde la Tierra siempre se ve la misma cara de la Luna. Esto significa que la Luna gira sobre su propio eje una sola vez por cada vuelta que da alrededor de la Tierra, es decir, que un día lunar dura lo mismo que un mes sinódico: 29 días, 12 horas, 43 minutos y 12 segundos. Esto es, sus periodos de rotación y de traslación 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 el espacio) 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 con frecuencia fuera de la línea directa entre el Sol y la Tierra. Por esta razón, 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 ello, cada año se producen dos eclipses solares. El mayor número de eclipses que se pueden producir en un año son siete, de los cuales tres son lunares y cuatro solares. Por lo general, anualmente hay de cuatro a cinco eclipses.

Los eclipses totales de Sol son espectáculos memorables. A causa de una notable coincidencia, en ningún otro planeta se puede ver algo semejante. Dado que el Sol es 400 veces mayor que la Luna y, además, se encuentra 400 veces más alejado de la Tierra, para los observadores terrestres tanto el Sol como la Luna parecen tener el mismo tamaño. Gracias a esto nuestro satélite llega a cubrir exactamente el disco solar, dejando ver solamente los brillantes rayos que despide la corona solar, produciéndose, en esta forma, un eclipse espectacular.

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 zona de 269 kilómetros de diámetro, y únicamente los afortunados que se encuentren dentro de esa zona podrán disfrutar del espectáculo que les brinda el eclipse. Los que estén en un perímetro de unos 3 200 kilómetros alrededor de dicha sombra podrán ver un eclipse

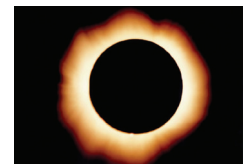
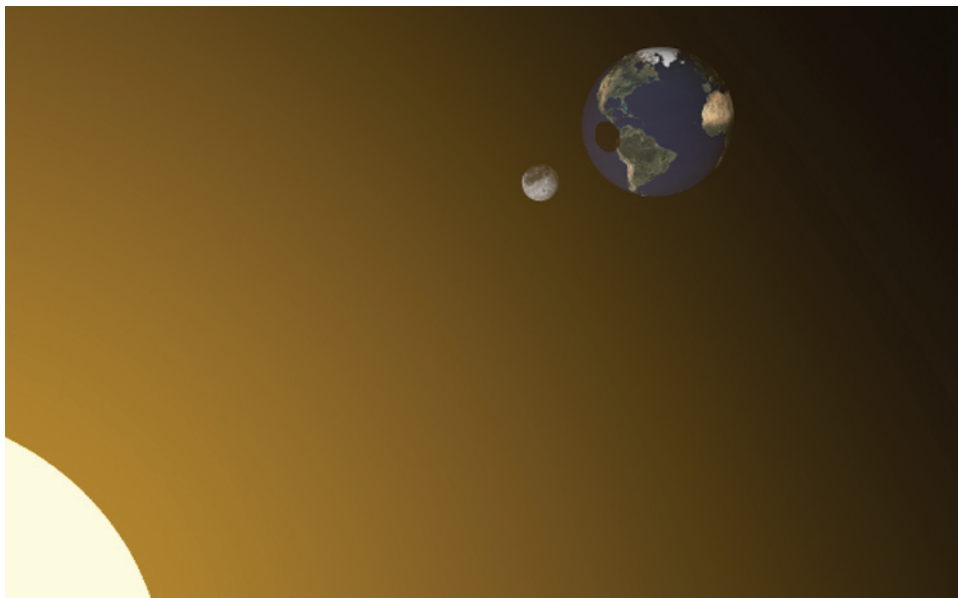


Figura 74 | Eclipses.

parcial. En la figura se muestran las trayectorias 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 oscura, 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.

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 oscuridad casi tan profunda como la de la noche. Los pájaros, desconcertados, vuelan a sus nidos creyendo que es de noche. Lo más extraño de todo es ver cómo las estrellas brillan en el negro cielo a pesar de que aún es pleno día. Otro de los espectáculos maravillosos es la hermosa 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. La sombra que proyecta la Tierra sobre la superficie lunar es vista, al mismo tiempo, por todos los habitantes de un hemisferio. 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 oscurecimiento 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 1 hora y 50 minutos. Durante un eclipse total, la Luna presenta un tono rojizo. Esto se debe a la refracción de la luz solar sobre el borde de la Tierra, causada por la atmósfera. Una cantidad de luz rojiza solar penetra en la región de la “umbra” e ilumina la Luna, haciéndola parecida a una moneda de cobre. 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 se puede hablar de algún beneficio que haya traído consigo la segunda guerra mundial, 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 a pesar de haber colaborado con el ejército alemán en el diseño y construcción de los misiles intercontinentales V2, no era simpatizante de Hitler; incluso llegó a expresar públicamente su desinterés por la guerra y su pasión por los viajes espaciales. Hacia el final de la guerra, von Braun se rindió ante 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 a gran velocidad el gas producto de la combustión. La acción de salida del gas provoca una reacción que impulsa al cohete de acuerdo con 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.

Pensemos ahora que tenemos un cohete (o motor a reacción) lo suficientemente potente como para elevar un cuerpo a una altura tal que rebase la atmósfera. De este modo no existiría la fuerza de fricción con el aire y, además, la fuerza de atracción gravitacional es mucho menor que en la superficie de la Tierra. Si en este punto desviamos el proyectil en dirección perpendicular a la superficie, como en el caso anterior, con la velocidad suficiente, el proyectil daría la vuelta a la Tierra, es decir, estaría en órbita como los satélites artificiales actuales, aun 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. O bien, es posible salir de esta órbita hacia otro planeta.

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 físico César Sepúlveda Núñez.

Como el lector podrá darse cuenta, las bases para los viajes espaciales fueron las *Leyes de Newton* y la *Ley de la Gravitación Universal*, 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.

Las leyes de conservación

La energía: una idea fructífera y alternativa al concepto de fuerza

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

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 puede variar al intercambiarla con otro u otros cuerpos.

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. A continuación se hablará de otra ley en la que intervienen los efectos que estas fuerzas producen; una ley que relaciona las fuerzas con el movimiento.

Conociendo la masa y la velocidad de un objeto en movimiento se pueden conjuntar en una magnitud cinética más simple 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 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, que experimentalmente resulta ser igual al cociente de las dos masas

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

Por lo tanto,

$$m_1 v_1 - m_1 v'_1 = m_2 v'_2 - m_2 v_2, \quad (1)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2, \quad (2)$$

$$p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2 = \text{cte.} \quad (3)$$

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

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

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

La energía cinética

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

Siguiendo sus ideas, se va a definir 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

$$T = \frac{1}{2}\sum m_n v_n^2,$$

donde la letra griega mayúscula Σ (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. Entonces:

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

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:

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

ya que la energía cinética se conserva:

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

Esta ecuación sólo es válida para colisiones elásticas. Este resultado fue encontrado por Christiaan Huygens (1629-1695), quien estableció que para las colisiones elásticas existen dos conservaciones: la del ímpetu y la de la energía cinética.

Trabajo

Cuando sobre un cuerpo actúa la fuerza de otro cuerpo a lo largo de una distancia, se transmite energía de un cuerpo a otro; se dice que se realiza trabajo. Posteriormente se verá que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. La energía almacenada en una cantidad de gasolina se puede consumir en el motor de un automóvil; esta energía se ha transferido al automóvil para moverlo. En este caso se puede medir lo que costó el proceso, ya que se conoce la cantidad de combustible utilizado.

Si se quiere que el coche 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:

$$\text{Fuerza} \times \text{distancia recorrida.}$$

Sus unidades en SIU serán *Newton* por *metro*. A esta unidad se le llama joule, 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 posee entonces 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.

Así que, como $F = ma$, el trabajo W realizado por la fuerza será:

$$W = Fx = max.$$

Dado que

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

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

$$at = v_2 - v_1 \quad (1)$$

$$t = \frac{v_2 - v_1}{a} \quad (2)$$

Para aceleración constante:

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

Si se sustituye t se tiene:

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

de donde

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

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

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

Sustituyendo en la ecuación para el trabajo W ,

$$W = Fx = m \frac{v^2}{2}.$$

Por lo tanto, 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.

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.

Considerando la suma de la energía potencial y la energía cinética en cualquier punto de su caída:

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

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:

$$E = m \frac{v^2}{2}.$$

Por lo tanto, $mgh_1 = mv^2/2$ nos dice que la energía mecánica total se conserva en cualquier punto de la trayectoria. 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:

$$E = mgh_1 = mgh + m \frac{v^2}{2}.$$

Para una altura h cualquiera, tendremos que la velocidad es:

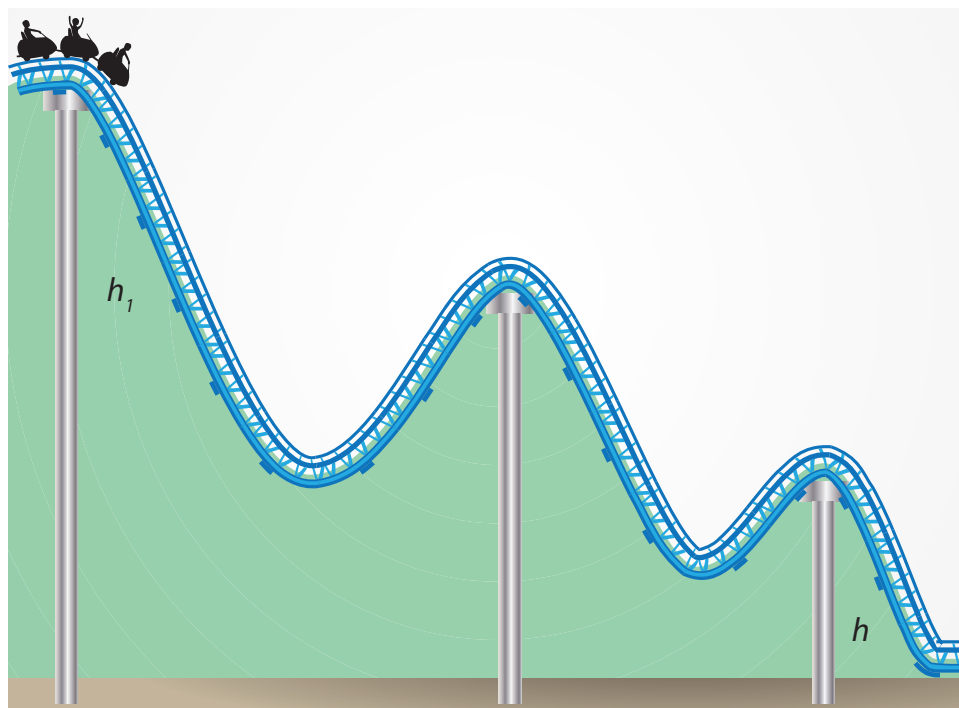
$$v^2 = 2g(h_1 - h),$$

$$v = \sqrt{2g(h_1 - h)}.$$

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 $v = \sqrt{2gh_1}$, y si $h = h_1$, entonces $v = 0$.

Figura 75 | Montaña rusa.



LA LUZ Y SUS PROPIEDADES

Desde tiempos remotos y en los lugares más diversos de nuestro planeta, los seres humanos se han maravillado ante las manifestaciones de la naturaleza. En particular, sigue siendo motivo de admiración la aparición del arcoíris, de un rojo horizonte en el crepúsculo o del intenso azul del cielo de un día despejado; todos ellos, fenómenos relacionados con la luz. Siempre ha habido personas que se han preguntado: ¿por qué ocurre esto?, ¿cómo es que se produce? Algunas de ellas se han abocado al estudio de estos fenómenos y han aportado 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.

La explicación de la formación del arcoíris la dio Isaac Newton a fines del siglo XVII, y Lord Rayleigh (1842-1919) explicó el azul del cielo un siglo después.

En el siglo XIX se aceptó que la luz tiene 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 aun en el día en lugares cerrados, se usan fuentes artificiales.

Nuestra 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, etc. En cuanto a fuentes artificiales, en la actualidad son muchas y muy diversas. Basta recordar que se cuenta con focos incandescentes y lámparas de diversos tipos.

La luz solar es factor 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. Para ello, es necesario que todos los objetos estén iluminados; esto es, que incida luz sobre ellos y que al ser reflejada la percibamos con nuestros ojos. Desde luego, también percibimos la luz emitida por la fuente luminosa, no sólo la reflejada por los objetos.

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 traslúcidos. Entre los transparentes se pueden enlistar el aire, el agua, el vidrio y algunas sustancias como el alcohol, la acetona, y otras. Los materiales traslúcidos permiten el paso de la luz en forma difusa, sin permitir ver con claridad lo que está del otro lado. Ejemplos de ello son las láminas acrílicas para techos o los vidrios esmerilados.

Figura 1 | Materiales transparentes y traslúcidos.

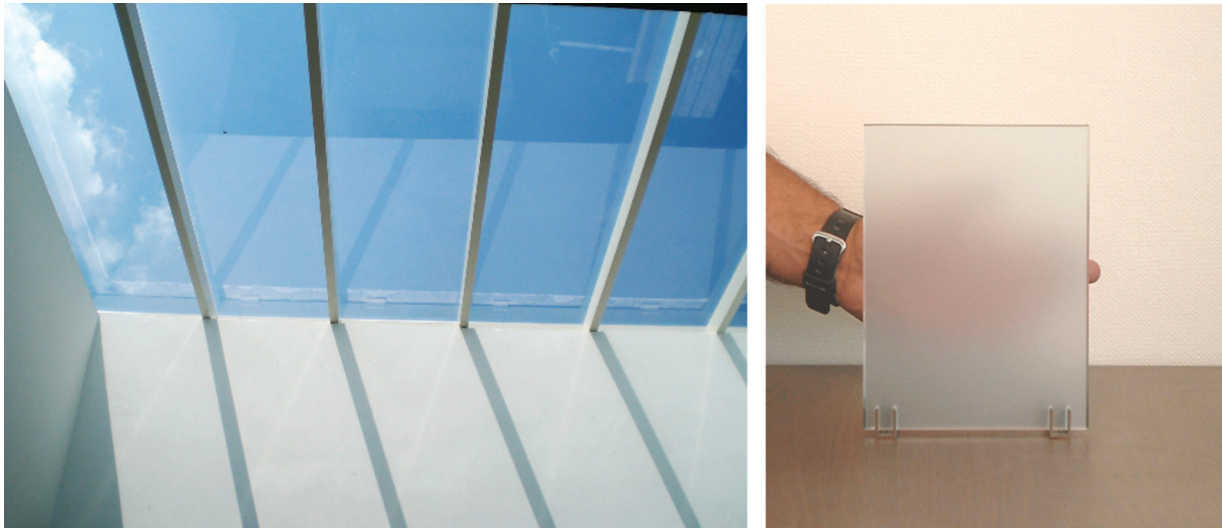


Figura 2 | Botella proyectando su sombra en la pared.



Los materiales a través de los cuales la luz no puede transmitirse se denominan opacos. Con éstos están contruidos la mayor parte de los objetos en nuestro entorno. Además, usamos objetos elaborados a partir de materiales opacos para protegernos de los rayos solares, evitando así la insolación e incluso algunas quemaduras provocadas por la exposición a la radiación solar.

La característica de los cuerpos opacos es la de no permitir que la luz pase a través de ellos, lo que da lugar a la formación de sombras. Todos hemos visto, en un día soleado, nuestra propia sombra proyectada en el suelo o la sombra de otros cuerpos. Esto se debe a que la luz que incide sobre ellos no puede atravesarlos y viaja en línea recta (fig. 2).

La luz del Sol (luz blanca) se descompone en los colores del arcoíris

Las ondas electromagnéticas están formadas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Éstas son producidas por cargas eléctricas que oscilan a muy alta frecuencia. Las ondas electromagnéticas se expanden radialmente viajando a una velocidad de 300 000 km/s, en el vacío.

Las fuentes luminosas están formadas por una infinidad de átomos excitados vibrando a muy variadas frecuencias, incluidas las 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, infrarroja, luz visible, ultravioleta y rayos X, todas dentro de la familia de las ondas electromagnéticas.

Longitud de onda (λ) en metros

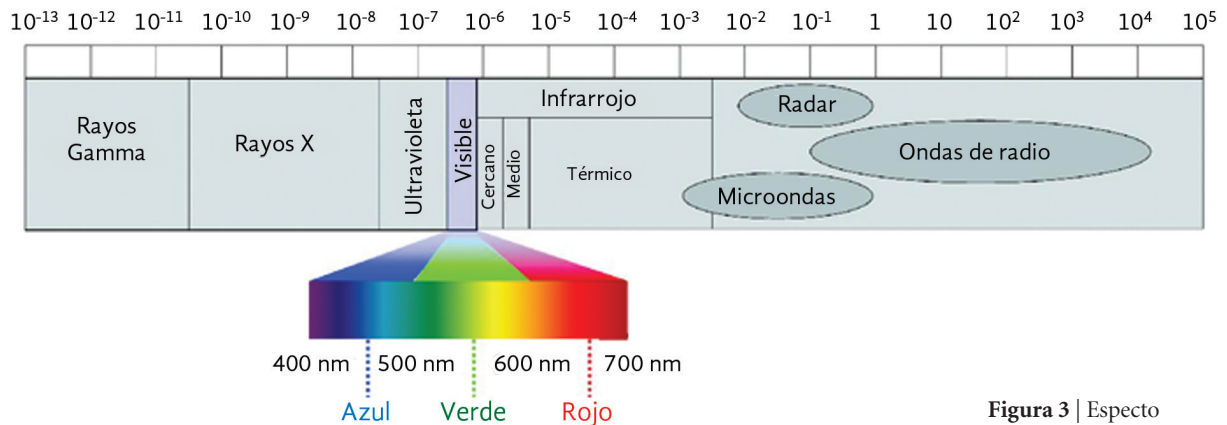


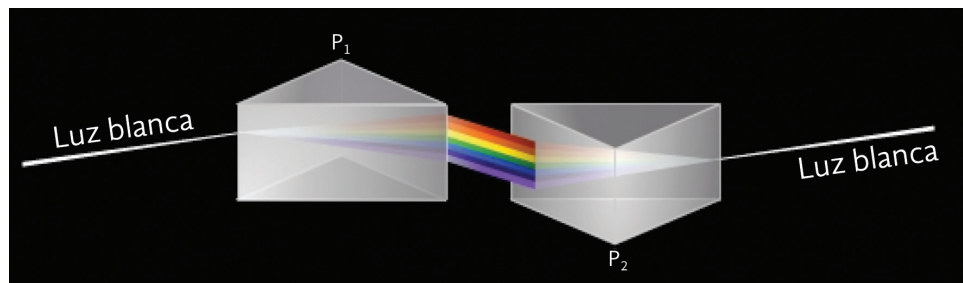
Figura 3 | Espectro electromagnético.

Como se puede ver en la figura 3, 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).

Isaac Newton (1642-1727) trabajó con la parte visible del espectro electromagnético. En febrero de 1672 se publicó el artículo de Newton titulado “Una nueva teoría acerca de la luz y los colores”, en el cual describe su demostración de la naturaleza de la luz blanca. Newton 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 arcoíris. Con esto demostró que la luz blanca se puede descomponer 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 arcoíris 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 el rojo, el azul y el verde, y se les conoce como *colores primarios*.

Figura 4 | Dos prismas triangulares: en el primero se muestra la dispersión de la luz blanca en los colores del arcoíris; en el segundo, la recreación de la luz blanca al hacer converger a los haces de colores en un punto.



ACTIVIDAD

Elaborar con cartón blanco un disco con sectores que contengan los colores del arcoíris, en la debida proporción. Pasar un lápiz por el centro del círculo de modo de que se construya una especie de pirinola. Hacerla girar y observar lo que pasa con los colores plasmados en el círculo.

Revisar en internet la elaboración de un “disco de Newton” y corregir si procede.

Los objetos se ven debido a que parte de la luz que reflejan llega a los ojos. Un objeto se ve de color azul, si absorbe todos los colores de la luz blanca que lo ilumina, excepto el azul, que se refleja. Se puede decir que cada objeto tiene la capacidad 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, éstas se ven verdes porque de la luz blanca que incide en ellas, las hojas reflejan el verde y absorben los colores restantes.

Nociones sobre reflexión y refracción de la luz

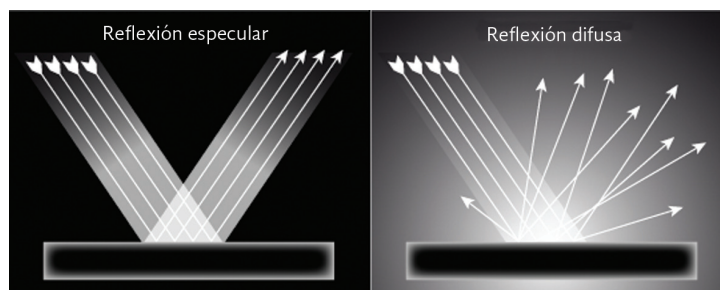


Figura 5

incidente y su reflexión en la superficie del espejo (fig. 5).

Figura 6



Las personas, antes de salir a sus actividades diarias, por lo general usan un espejo en su arreglo cotidiano. Las personas y los objetos del entorno son reflejadas en los grandes vidrios de los almacenes y plazas comerciales. La imagen de vehículos es captada en el espejo retrovisor de un automóvil, etc. Éstos son ejemplos de reflexiones en espejos planos.

Otro fenómeno importante con relación a la luz es la refracción. Ésta se manifiesta, por ejemplo, cuando observamos una cuchara dentro de un vaso transparente con agua y se ve un poco “torcida”. También se manifiesta cuando, en una alberca, a un bañista se le aprecian las piernas más cortas de lo que en realidad son, o cuando en una fuente con peces, nos parece que están más cerca de la superficie del agua de lo que en realidad están (fig. 6).

El estudio de la refracción y la reflexión de la luz ha dado las bases para el diseño y construcción de instrumentos y aparatos que han ayudado a las personas a mejorar su calidad de vida, como los anteojos para corregir defectos visuales, las cámaras fotográficas, los microscopios o los telescopios, por mencionar algunos.

Reflexión y refracción de la luz. Estudios cuantitativos

Reflexión de la luz en espejos planos

Se estudiará cuantitativamente la formación de imágenes en espejos planos.

ACTIVIDAD

Con ayuda de un espejo plano, una hoja de papel blanco, dos lápices sin punta nuevos e iguales, una regla, una escuadra y un transportador, se puede hacer un sencillo experimento que conduce a concluir que los ángulos con los que inciden y se reflejan los rayos de luz en espejos planos, medidos con respecto a la normal (línea perpendicular al espejo), son iguales. Ésta es la *ley de la reflexión de la luz en espejos planos*.

Se pega la hoja de papel blanco con cinta adhesiva, sobre una mesa; con la regla se traza una línea a lo largo de la parte central de la hoja. Se fija el espejo plano con la plastilina sobre la línea trazada en posición vertical. Se dibuja una equis en la hoja de papel de manera que se refleje en el espejo. Al punto señalado con la equis se le marca con la letra O (objeto). Ahora se coloca uno de los lápices sobre ese punto, y se pide a alguien que marque otro punto, frente al espejo, con la letra A, que será el punto de observación. Luego se colocará otro lápiz detrás del espejo, justo en el punto en que, desde su posición (el punto A), parezca que es justo la prolongación de la imagen que se ve en el espejo (de esta manera se estará ubicando la posición de la imagen). Localizado este punto detrás del espejo, se señalará con una equis, y se identificará con la letra O'. En la hoja de papel quedarán señalados tres puntos: O, O' y A. Ahora se escoge otro punto de observación, B, y se repite la actividad. Se hará evidente que O' coincide también con la del punto en que desde la posición B se ve la prolongación del lápiz detrás del espejo. Se retira el espejo, quedando ahora cuatro puntos: O, O', A y B.

Con ayuda de la regla, se traza una línea de O' a A y, con otro color, otra de O' a B, los segmentos de línea delante del espejo, se trazan con una línea continua, y los de atrás del espejo con una línea punteada. Ahora, con la ayuda de una escuadra, se dibujan líneas perpendiculares a la del espejo en cada punto de intersección, hacia la parte de enfrente del espejo. Con ello se estará dibujando la línea normal para cada uno de los puntos de observación. Luego se dibujan las rectas que van del punto O a cada uno de los puntos de intersección de las primeras rectas con el espejo.

Ahora, se dibujan puntas de flecha en las rectas que van de la línea del espejo a los puntos A y B llegando a ellos. Se dibujan también las correspondientes dos puntas de flecha saliendo del punto O hacia el espejo.

En la figura se tienen claramente dos rayos saliendo del punto O e incidiendo en el espejo. Éstos son los *rayos incidentes*.

En la figura hay también dos rayos reflejados: uno sale del espejo y llega al observador A, y el otro sale del espejo y llega al observador B. Son los *rayos reflejados*.

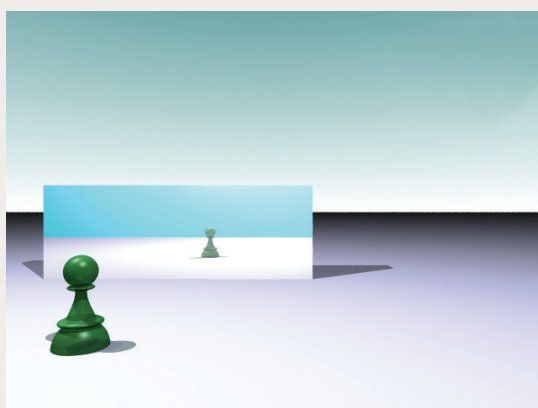


Figura 7 | © Raúl Espejel.

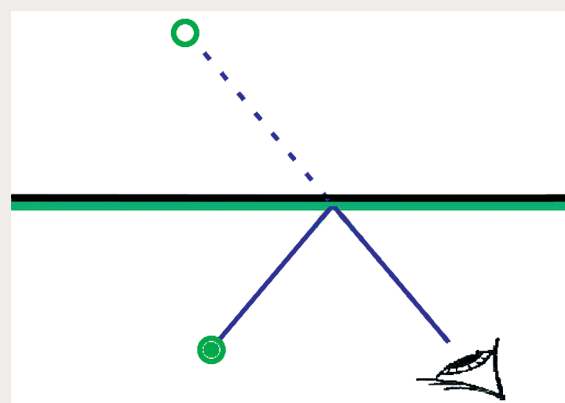


Figura 8 | © Raúl Espejel.

Así, para los dos observadores, se tiene el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado. Se pueden ahora identificar y dibujar los ángulos de incidencia y reflexión para cada uno de los casos. Cada ángulo de incidencia se mide con el transportador, entre el rayo incidente y la normal; y cada ángulo de reflexión se mide entre el rayo reflejado y la normal.

Analizando el dibujo obtenido se puede comprobar que los ángulos de incidencia y de reflexión, son iguales.

Se verifica también, con este experimento, que en los espejos planos la imagen tiene igual tamaño que el objeto y que la distancia de la imagen al espejo es igual a la distancia del espejo al objeto.

Se puede verificar experimentalmente una segunda ley de reflexión de la luz en espejos planos que establece: el ángulo de incidencia, el ángulo de reflexión y la normal están en un mismo plano.

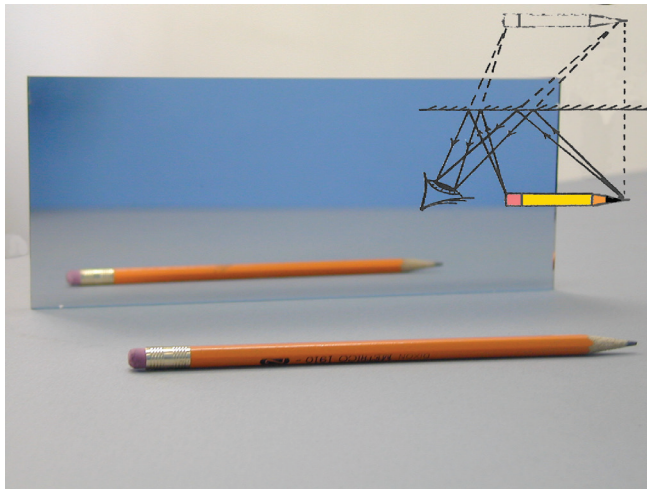


Figura 9 | © Raúl Espejel.

¿Existe o no inversión horizontal en la imagen que forman los espejos planos?

Considere un lápiz colocado horizontalmente frente a un espejo plano como se muestra en la figura 9. Desde todos los puntos de la superficie del lápiz salen rayos de luz reflejada, y una parte de ellos va a incidir al espejo. Así que al espejo llegan infinidad de rayos de luz, los cuales cumplen las leyes de la reflexión. En esta figura se muestran sólo dos rayos originados en la punta del lápiz que se reflejan en el espejo hacia el ojo del observador. Los rayos divergen de la punta del lápiz y se prolongan desde el espejo al reflejarse. Así, estos rayos divergentes parecen provenir de un punto ubicado atrás del espejo.

Un análisis semejante puede hacerse para los ra-

ayos de luz procedentes de cualquier otro punto de la superficie del lápiz y que inciden y se reflejan en el espejo para luego 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 virtualmente como si de ella proviniera. Esto es, como si en realidad hubiese un lápiz en esa posición. Como se puede ver, y coincidiendo con el experimento, la imagen está detrás del espejo, a la misma distancia que el objeto real frente al espejo. También se confirma 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 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 la mano izquierda; si levanta la izquierda, su imagen levanta la derecha. Parecería que los espejos planos nos dan imágenes invertidas izquierda-derecha. Pero no hay tal inversión, y eso lo confirmamos con la imagen obtenida para el lápiz en la figura anterior.

Otra manera de confirmar que no hay tal inversión, es poniendo frente al espejo una letra, digamos una “E”, recortada en cartoncillo; no se observa en la imagen ninguna inversión.

Refracción de la luz entre dos medios transparentes con frontera plana

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro 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 interés es la trayectoria que seguirá la luz al pasar de un medio a otro.

Se sabe, según se vio en el apartado “Las interacciones entre objetos y su movimiento”, que la velocidad de una onda cambia al pasar de un medio a otro; y la luz, siendo un fenómeno ondulatorio, también cambia su velocidad 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 90°), se desviará al entrar al segundo medio, precisamente por el cambio que sufre en su velocidad; y 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), y 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,

$$n = \frac{c}{v}$$

Y, por supuesto, el índice de refracción no tiene unidades, pues es un cociente entre velocidades. 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.

Ahora, si el rayo de luz pasa del agua al aire, entonces el rayo refractado se aleja de la normal; y algo semejante ocurre siempre que un rayo de luz pasa de un medio con índice de refracción mayor a otro con índice de refracción menor (fig. 10).

A continuación se presentan algunos de los valores del índice de refracción:

Sustancia	Índice de refracción (<i>n</i>)
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

Figura 10 | © Raúl Espejel.

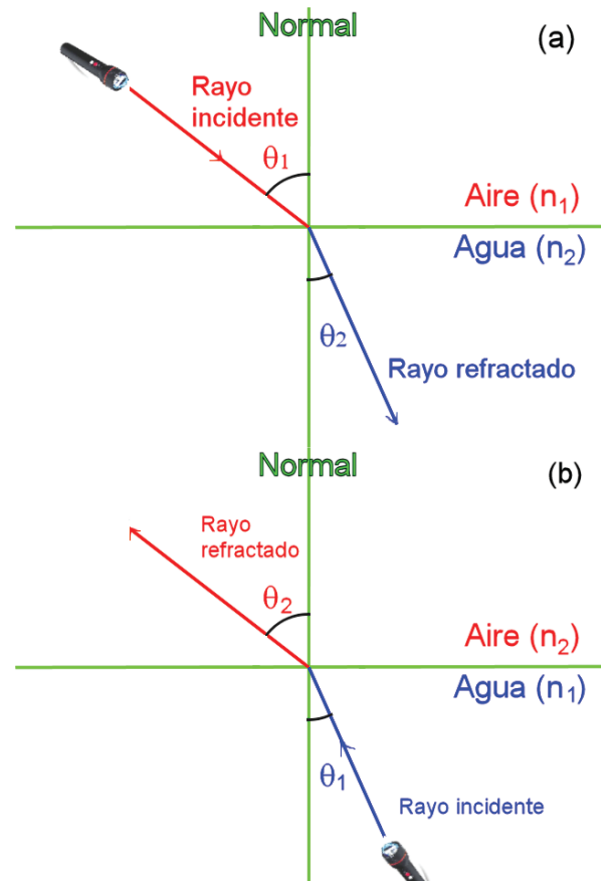




Figura 11 | © Raúl Espejel.

Dado que los rayos de luz que pasan del agua al aire se refractan alejándose de la normal, cuando una persona se encuentra en una alberca, con el agua a la cintura, 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 y las piernas se ven más cortas (fig. 11). Con un razonamiento semejante se puede concluir que 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 :

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2.$$

Aquí, 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.

Es conveniente ver con detenimiento lo que, en este caso, dice el lenguaje matemático. Si $n_2 > n_1$, necesariamente debe cumplirse que $\theta_2 < \theta_1$ (si ambos ángulos son menores de 90°), para que se cumpla la igualdad; en relación al fenómeno óptico, quiere decir que si la luz va de un medio de mayor índice de refracción a uno menor, ésta se refracta alejándose de la normal.

Por lo anterior, una vara sumergida en agua se ve doblada, ya que la luz procedente de la parte sumergida se refracta al salir al aire.

Por lo anterior, una vara sumergida en agua se ve doblada, ya que la luz procedente de la parte sumergida se refracta al salir al aire.

A continuación se desarrolla un ejemplo de aplicación de la *Ley de Snell*.

1. 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:

$$\theta_1 = 35^\circ, n_1 = 1.3 \text{ y } n_2 = 1.0,$$

entonces, sustituyendo los valores en la ecuación:

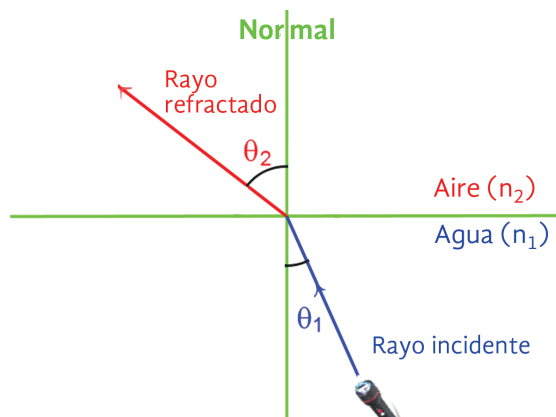
$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2,$$

se tiene que

$$\sen \theta_2 = \frac{n_1 \sen \theta_1}{n_2} = \frac{(1.3)(\sen 35^\circ)}{1.0} = 0.76.$$

Aplicando la función inversa del seno (arcoseno), se obtiene que $\theta_2 = 49.9^\circ$.

Figura 12 | © Raúl Espejel.



2. Si un buzo observa que los rayos del Sol bajo el agua forman un ángulo de 27° con respecto a la vertical, ¿a qué ángulo por encima del horizonte se encuentra el Sol? Entonces, se quiere calcular θ_1 y se sabe que:

$$\theta_2 = 27^\circ, n_1 = 1.0 \quad \text{y} \quad n_2 = 1.3.$$

El ángulo $\alpha = \text{ángulo por encima del horizonte} = 90^\circ - \theta_1$

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{n_2 \text{sen } \theta_2}{n_1} = \frac{(1.3)(\text{sen } 27^\circ)}{1.0} = 0.6$$

por lo tanto, $\theta_1 = 37.2^\circ$,

entonces $\alpha = 90^\circ - \theta_1 = 90^\circ - 37.2^\circ = 52.8^\circ$.

De manera que el Sol se encontraría a un ángulo de 52.8° por encima del horizonte.

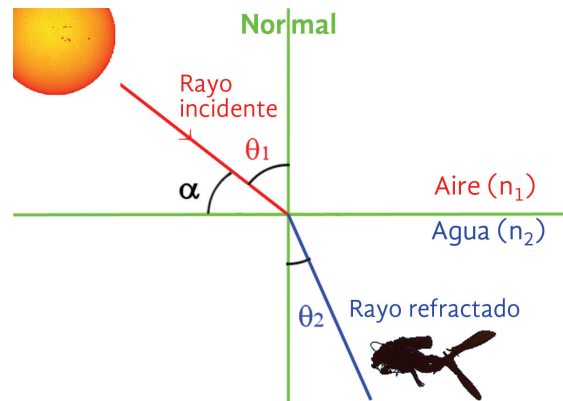


Figura 13 | © Raúl Espejel.

Formación de imágenes usando espejos curvos. Imágenes reales. Imágenes virtuales

¿Por qué en algunos espejos las imágenes sí se ven invertidas (arriba-abajo)? Eso ocurre en algunos espejos curvos, y para dar respuesta a esta pregunta es necesario estudiar la formación de imágenes en este tipo de espejos. Cabe destacar que en nuestra vida diaria es frecuente el uso de espejos curvos; por ejemplo, en algunos espejos retrovisores de los automóviles. También se usan en tiendas departamentales, como un recurso auxiliar en la vigilancia; o en la calle, en algunas esquinas, para prevenir accidentes automovilísticos. Desde luego, también existen en algunos parques de diversiones espejos con curvaturas particulares que reflejan 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. En este caso se tienen, por supuesto, dos tipos de espejos: los cóncavos y los convexos (fig. 14 a y b, respectivamente).

¿Cómo son las imágenes formadas en espejos convexos?

Una esfera de Navidad es un buen ejemplo de espejo esférico convexo. Refleja, de cada objeto posicionado frente a él, una imagen derecha y de menor tamaño que el objeto real. Desde luego que las leyes de la reflexión de la luz siguen siendo válidas para espejos curvos, aunque las líneas

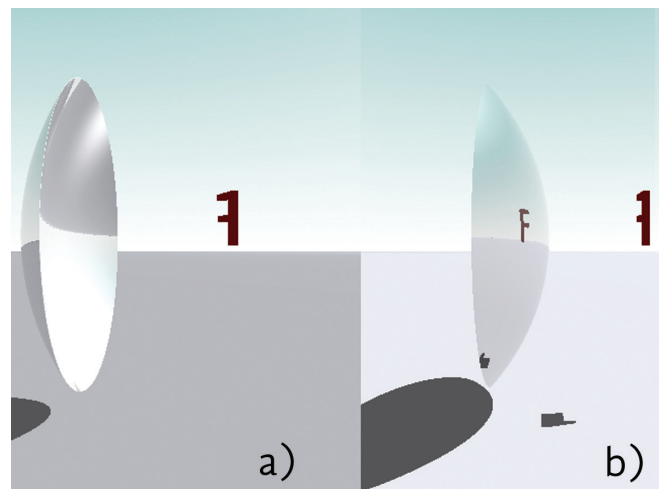


Figura 14 | © Raúl Espejel.

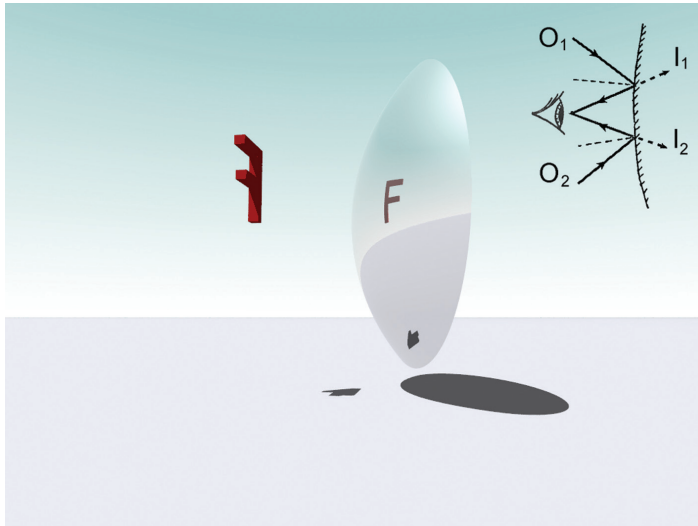
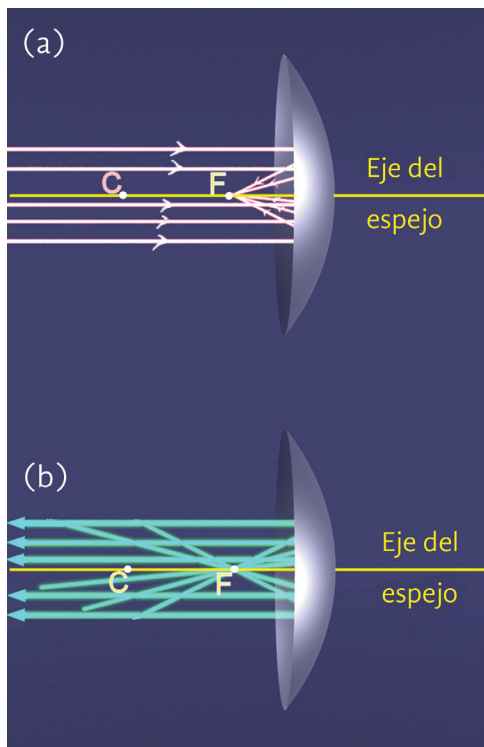


Figura 15 | © Raúl Espejel.

por el punto focal, F , y que los rayos que llegan al espejo, pasando por este punto, se reflejan en dirección paralela al eje del espejo. Aquí también se cumplen las leyes de la reflexión de la luz analizadas anteriormente. Es pertinente enfatizar que para espejos esféricos, el punto focal o foco del espejo, se encuentra en el punto medio entre éste y su centro de curvatura; esto es, $F = r/2$, como se muestra en la figura 16.

Si el objeto se encuentra a una distancia mayor que la distancia focal, entonces la imagen será invertida y se formará donde convergen los rayos reflejados. En la figura 17 sólo se han dibujado tres de los rayos que proceden del objeto, los cuales bastan para describir la imagen.

Figura 16 | © Raúl Espejel.



Debido a que se forma donde convergen los rayos de luz reflejados, a esta imagen se le denomina *imagen real* y puede verse en una pantalla o en una película fotográfica colocada en ese lugar.

Ahora, si el objeto se encuentra a una distancia menor que la distancia focal, entonces la imagen será derecha y virtual, ya

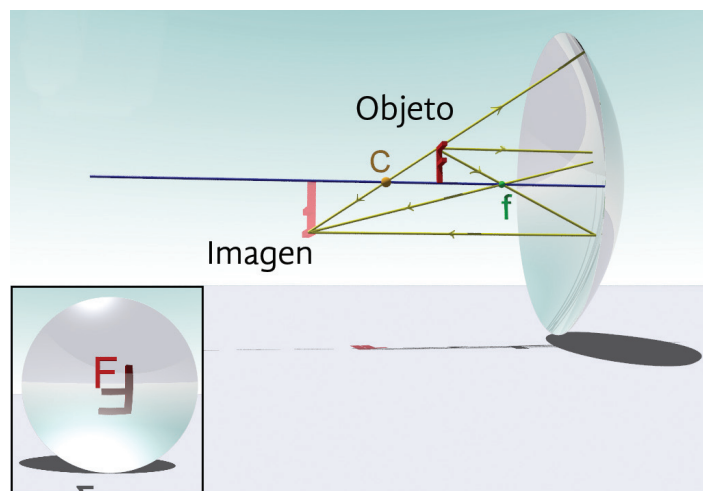


Figura 17 | © Raúl Espejel.

normales cambian de dirección en cada punto del espejo y no son paralelas entre ellas, como muestra la figura 15. Por lo tanto, la imagen es virtual.

Ahora se estudiarán las imágenes formadas en espejos cóncavos. Un espejo esférico cóncavo da imágenes invertidas o derechas, dependiendo de la distancia a la que el objeto se encuentre de él.

Antes de analizar cómo se forman estas imágenes, es necesario tener presente que estos espejos se comportan de forma parecida a los espejos parabólicos, donde los rayos de luz que llegan al espejo y que son paralelos al eje del mismo se reflejan pasando

que la luz no pasa realmente por la imagen porque ésta se forma detrás del espejo. Como se puede ver en el diagrama (fig. 18), la imagen es más grande que el objeto real, de ahí que este tipo de espejos se usen con frecuencia como auxiliar en la revisión de afecciones en la piel, ya que se obtienen imágenes amplificadas.

Formación de imágenes usando lentes biconvexas (lupas). Imágenes virtuales

Lentes convergentes y divergentes

Si se considera una lente biconvexa —esto es, con sus dos curvaturas hacia afuera, como la mostrada en la figura 19—, 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 que son paralelos a su eje, se desvían, de acuerdo con la *Ley de Snell*, y al salir de la lente 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 *longitud focal* (o *distancia focal*) y se representa con la letra *f*.

En la lente biconcava, con sus dos curvaturas hacia adentro, los rayos de luz que inciden en ella y que son paralelos a su eje se desvían, de acuerdo con la *Ley de Snell*. Al salir de la lente divergen de tal manera que si esos rayos se prolongan hacia el lado de la lente por donde llegaron los rayos incidentes, entonces convergen en un punto sobre el eje, también conocido como *punto focal*, que se representa con la letra *F*.

Al igual que en el ejemplo anterior, la distancia medida del punto focal al centro de la lente se conoce como *longitud focal* (o *distancia focal*) y se representa con la letra *f* (fig. 20).

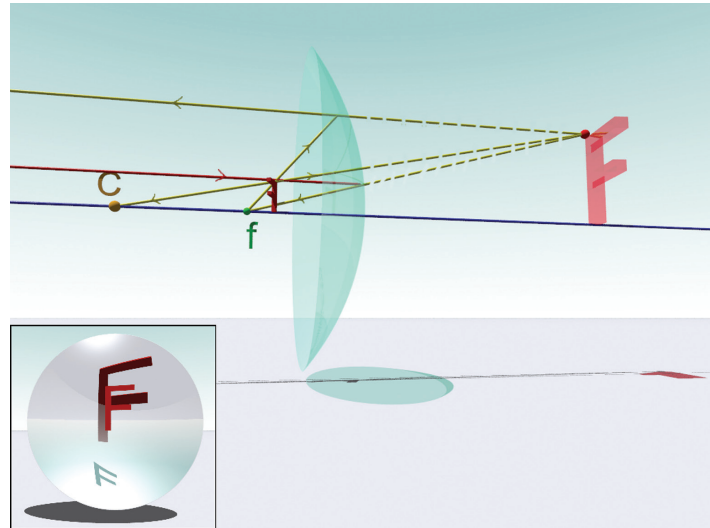


Figura 18 | © Raúl Espejel.

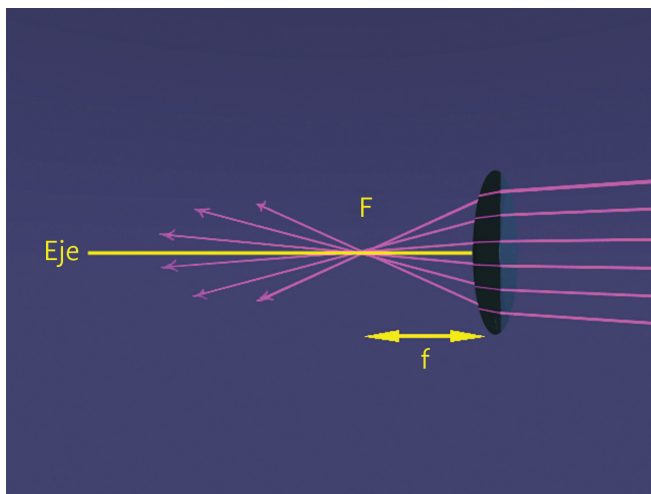


Figura 19 | © Raúl Espejel.

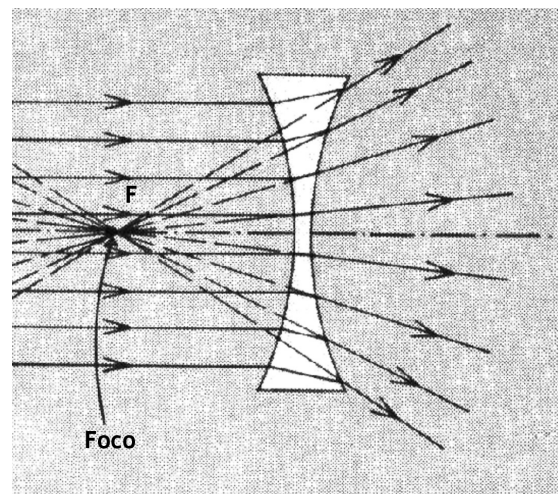


Figura 20

Formación de imágenes usando lentes biconvexas

Para este tipo de lentes, 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 en dirección paralela a su eje. Además, un rayo de luz que incida en el centro de la lente, pasará por ella sin desviarse.

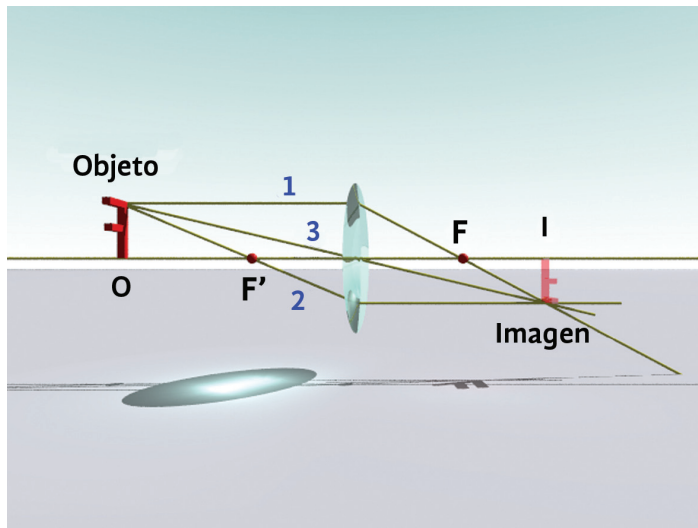


Figura 21 | © Raúl Espejel.

Con base en el comportamiento de estos tres rayos de luz, es posible predecir algunas características importantes de las imágenes que pueden formarse con una lente de este tipo. En la figura siguiente se muestran una letra “F” como objeto y una lente biconvexa que forma una imagen a la derecha. Seguiremos la trayectoria a tres rayos de luz que salen de la parte superior de la “F”.

El rayo 1 se dibuja paralelo al eje, y 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, y emerge de ella paralelo al eje.

El rayo 3 incide en el centro de la lente y pasa sin desviarse (fig. 21).

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 o verse directamente. Con una lente biconvexa se pueden obtener imágenes reales e invertidas de los objetos. El tamaño de la imagen obtenida depende de la distancia a la que se encuentra el objeto de la lente. Con estos diagramas de rayos, se puede explicar por qué se ven algunas veces imágenes invertidas con estas lentes.

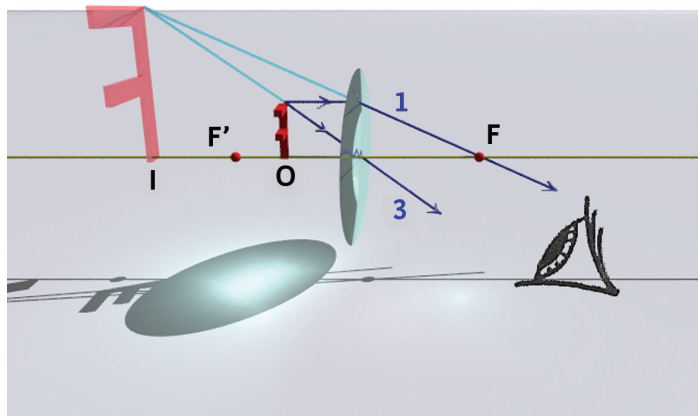


Figura 22 | © Raúl Espejel.

Se verá ahora la imagen que se forma de un objeto situado frente a ella, a una distancia menor que su distancia focal, mediante el trazo de los rayos que inciden en la lente biconvexa. Se sigue la trayectoria a dos rayos que salen de la esquina de la “F” (fig. 22).

El rayo 1 se dibuja sin mayor problema. El rayo 3 se dibuja pasando por el centro de la lente sin desviarse. Como puede verse en la figura, estos dos rayos, al salir de la lente divergen; esto es, no coinciden en ningún punto, de modo que no pueden formar una

imagen real; pero si estos dos rayos divergentes se prolongan hacia atrás, se encuentra el punto en que estas líneas convergirían, y en ese punto se forma la imagen virtual de la esquina de la “F”. De hecho, así se determina la posición en que se forma la imagen; además, es derecha y de mayor tamaño que el objeto.

En resumen, 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. Con esto, se da respuesta a aquella pregunta de por qué con una lupa los objetos se ven amplificados.

Para encontrar la distancia focal de alguna 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.

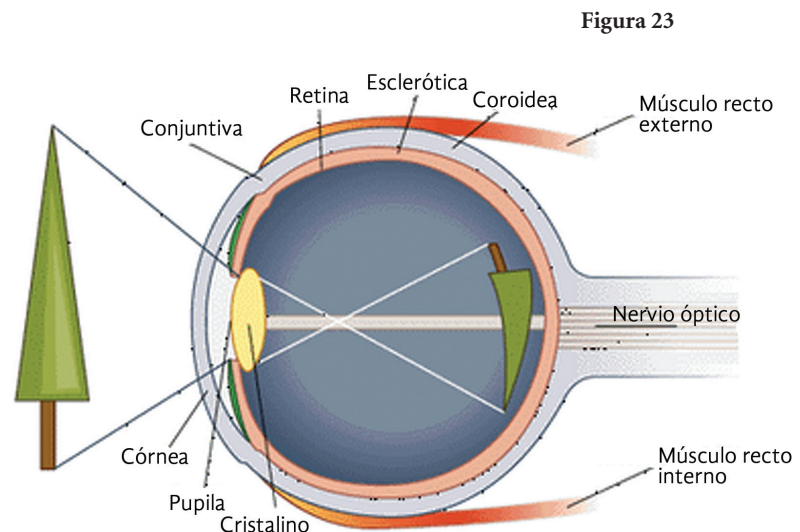
Una vez conocida la distancia focal, se pueden realizar diferentes experimentos colocando una lámpara a diferentes distancias de la lupa y una hoja de papel al otro lado de la lente para captar en ella la imagen de la lámpara. Si se coloca la lámpara en el foco no se observa ninguna imagen, pero si se coloca 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. Si se coloca la lámpara exactamente al doble de la distancia focal, la imagen aparecerá del mismo tamaño de la lámpara y la distancia a la que aparece la imagen invertida será el doble de la distancia focal. Si ahora se coloca 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 será más pequeña que el objeto.

Funcionamiento del ojo humano

El órgano de la visión es el ojo. Mediante éste percibimos los objetos del entorno, con sus formas, tamaños y colores. El proceso de la visión es el siguiente:

- Los rayos de luz entran al ojo por la pupila.
- Al atravesar la córnea y el cristalino, que es la lente del ojo, los rayos de luz se refractan enfocándose.
- Estos rayos convergen en la retina, donde se forma una imagen invertida y pequeña del objeto.
- La retina está formada por células sensibles a la luz (conos, bastones) que se estimulan y envían información al cerebro a través del nervio óptico. Con esta información, el cerebro elabora la imagen del objeto que se percibe.

Es pertinente aclarar que el ojo puede cambiar la forma del cristalino para ver con nitidez los objetos, dependiendo de la distancia a la que se encuentren.



Aparatos ópticos

A partir de las leyes de la reflexión y la refracción de la luz se han diseñado y construido una diversidad de aparatos e instrumentos ópticos que han contribuido a mejorar la calidad de vida de las personas y han venido a apoyar el desarrollo de la investigación científica. A continuación se dan algunos datos del contexto histórico en el que aparecieron diversos instrumentos ópticos, y una descripción de los principios en que se basa su funcionamiento.

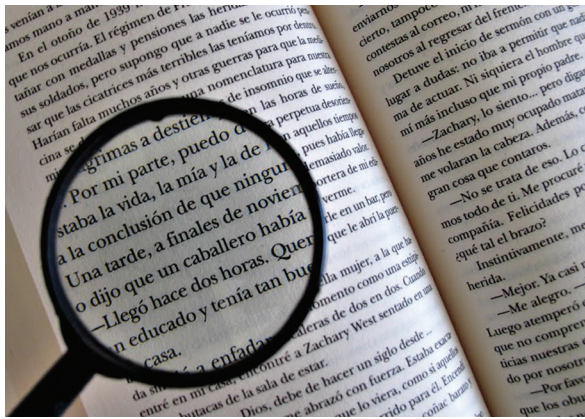


Figura 24 | La lupa funciona como un microscopio simple.

Lupa | Es una lente biconvexa que proporciona una imagen virtual ampliada del objeto observado; es decir, funciona como un microscopio simple (fig. 24).

Cámara fotográfica | Se inventó y empezó a ser popular en el siglo XIX. Consiste en una caja oscura en la que se utiliza una lente convergente para concentrar los rayos luminosos y enfocarlos sobre una película sensible a la luz. Actualmente las cámaras usan sensores electrónicos que sustituyen a la película (fig. 25).

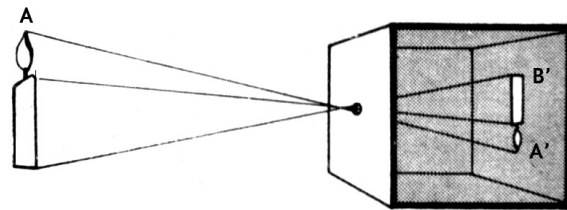


Figura 25 | Esquema de cámara fotográfica.

Periscopio | Es un instrumento para la observación desde una posición oculta, es decir, es un arreglo de espejos planos que permite ver lo que la parte alta de este instrumento logra visualizar. Su funcionamiento se basa, sencillamente, en la ley de la reflexión de la luz en espejos planos. Se usa en submarinos; versiones sencillas de este instrumento son populares en desfiles y otros actos públicos a los que acuden muchas personas (fig. 26).

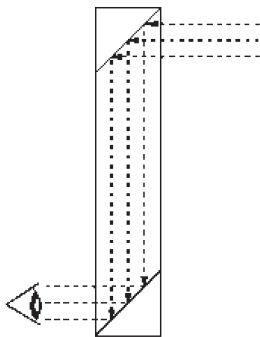


Figura 26 | Esquema del periscopio.

Lentes para la corrección de problemas visuales | Basan su funcionamiento en el empleo de lentes cóncavas y convexas.

Desde tiempos remotos, en la Roma imperial, Nerón —quien padecía miopía— utilizaba una esmeralda moldeada en forma cóncava, de media luna, para mirar las peleas de los gladiadores. Pero es alrededor del año 1000 de nuestra era cuando el físico y matemático árabe Alhazen (965-1040) escribe un amplio tratado sobre óptica, en el que describe cómo se forma la imagen en la retina humana debido al cristalino del ojo. Alrededor de 1266, el fraile franciscano inglés Roger Bacon (1214-1294) talló los primeros lentes y describió las propiedades de una lente para amplificar la letra escrita. Así, a finales del siglo XIII aparecen, en el norte de Italia —zona donde estaba muy desarrollada la tecnología del pulido de cristales—, las primeras lentes convergentes.

Las primeras lentes se fabricaron para la presbicia, esto es, el defecto visual de las personas que ven mejor de lejos que de cerca. 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. Las lentes cóncavas para miopes aparecen, aproximadamente, cien años más tarde. Se dice que ya las usaba el poeta y humanista italiano Petrarca (1304-1374). Después, con la invención de la imprenta en el siglo xv, se incrementó la demanda de anteojos. Los primeros anteojos bifocales se inventaron en la segunda mitad del siglo xviii. Se dice que Benjamin Franklin fue de los primeros en usarlos. Aquellos primeros estudios sobre lo que hoy denominamos óptica geométrica, realizados por el físico árabe Alhazen, fueron las bases para esos dispositivos tan útiles a la sociedad en su necesidad de ver mejor.

Los oftalmólogos utilizan el recíproco de la distancia focal ($1/f$) para referirse a la graduación de las lentes para anteojos, ya sean convergentes o divergentes. A $1/f$ se le conoce como *graduación de la lente*.

$$P = \frac{1}{f}.$$

Esta cantidad se mide en dioptrías (D); $1D = 1/m = 1 \text{ m}^{-1}$. Así, por ejemplo, una lente que tenga 50 cm de distancia focal, tiene una graduación de

$$P = \frac{1}{0.50 \text{ m}} = 2.0 \text{ m}^{-1} = 2.0 \text{ D}.$$

Nótese que la graduación de una lente varía de manera inversa con la distancia focal.

La miopía es la incapacidad de ver con claridad objetos lejanos, y ocurre cuando el globo ocular está alargado y la imagen de los objetos se forma delante de la retina. Una lente divergente permite que los rayos se enfoquen y formen la imagen nítida de los objetos lejanos en la retina (fig. 27).

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, por lo tanto, los rayos de luz convergen detrás de la retina. Esta falla en la visión se puede corregir con una lente convergente (fig. 28).

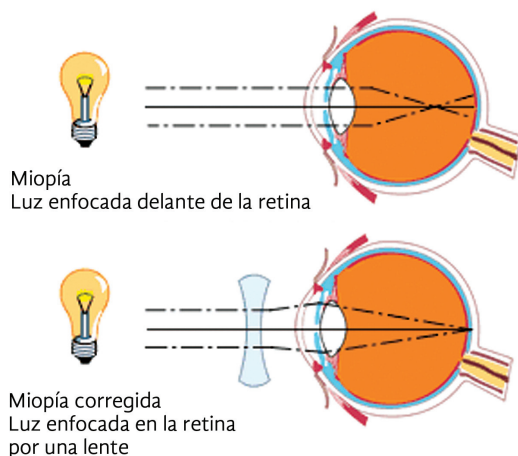


Figura 27 | Miopía.

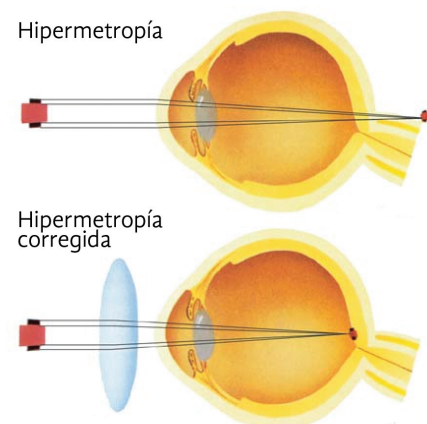


Figura 28 | Hipermetropía.

El microscopio compuesto | Una lupa es un microscopio simple, y con ella se pueden ver imágenes amplificadas de los objetos. Si se usa como objeto una imagen real producida por otra lente, se incrementará la amplificación aún más. Cuando se proyecta la imagen de un objeto en una pantalla, se coloca ésta en la posición donde se forma la imagen real; pero si no se colocara la pantalla, los rayos de luz continuarían su camino, entonces se pueden tomar como objeto de otra lente y conseguir así una mayor amplificación.

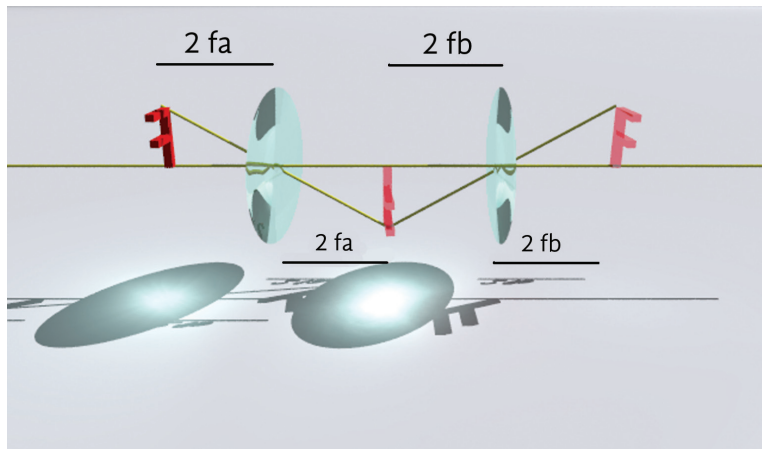


Figura 29 | © Raúl Espejel.

Se forma una segunda imagen (derecha respecto al objeto real) a una distancia $2f_b$ de la segunda lente.

Si se acerca la segunda lente a la primera imagen, de modo que la distancia sea menor que su distancia focal, se podría mirar a través de esta segunda lente (que llamaremos ocular) y ver una imagen virtual y de mayor tamaño que el objeto. Se puede obtener una mayor amplificación si las primeras distancias del objeto real a la primera lente son pequeñas, aunque mayores que la distancia focal, de manera que con la primera lente se obtenga un primer aumento; esto es, que se genere una imagen real de mayor tamaño y luego se utilice el ocular para conseguir un aumento aún mayor. Éstas son las bases del microscopio compuesto (fig. 30).

Figura 30 | Microscopio compuesto.



Galileo fue uno de los primeros científicos en utilizar un microscopio. En Italia se le considera inventor de este instrumento, hacia 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 Marcello Malpighi (1628-1694), quien probó la teoría del médico inglés William Harvey (1578-1657) sobre la circulación sanguínea al observar en el microscopio los vasos capilares. También el científico inglés Robert Hooke (1635-1703) observó con un microscopio un delgado corte de corcho y descubrió las células de este material; de hecho, ésa fue la primera observación de células muertas. El biólogo y comerciante holandés Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), utilizando microscopios de manufactura propia, describió por primera vez protozoarios, bacterias, espermatozoides y glóbulos rojos. Este invento fue un pilar importante en el desarrollo de la biología y los estudios médicos. Al paso de los años los microscopios ópticos han sido perfeccionados.

El telescopio | Su funcionamiento se basa en el empleo de dos lentes. Su uso ha contribuido en forma importante al conocimiento del Universo.

Aunque su invención, alrededor de 1608, se atribuye al comerciante holandés Hans Lippershey (1570-1619), quien era dueño de una fábrica de anteojos, se reconoce que Galileo Galilei fue uno de los primeros en usar este tipo de instrumentos y lo hizo para estudiar el cielo. En 1609, Galileo observó la superficie de la Luna encontrando que tenía cráteres y montañas. Observó algunos satélites girando en torno a Júpiter y que Venus presentaba fases como las de la Luna. Todas estas observaciones le dieron elementos para apoyar la tesis del sistema heliocéntrico de Nicolás Copérnico (1473-1543), por lo cual fue enjuiciado por la Santa Inquisición. Pero fue a partir de estas contribuciones de Galileo que se comprendió y aceptó la posición de nuestro planeta en el Sistema Solar y en el Universo. Desde los tiempos de Galileo a la fecha, el telescopio ha sido perfeccionado y ahora se fabrican telescopios capaces de captar imágenes de cuerpos ubicados a muchos años luz; e incluso en la actualidad se dispone de un potente telescopio puesto en órbita terrestre, el telescopio espacial Hubble (fig. 32).



Figura 31 | Telescopio de Galileo.



Figura 32 | Telescopio espacial Hubble.

Alcances y limitaciones de los instrumentos ópticos

Los microscopios y los telescopios —instrumentos ópticos usados en la investigación científica— han permitido ver mucho más allá de lo que el sentido de la vista puede permitir. Lo muy pequeño —como las bacterias y los protozoarios— y lo muy grande y lejano —como las nebulosas y las galaxias—. Hay, sin embargo, para ambos instrumentos ópticos, importantes limitaciones.

Con un microscopio óptico se presentan problemas para ver objetos tan pequeños cuyas dimensiones sean del orden de la longitud de onda de la luz, esto es, de alrededor de 500 nanómetros. Esta limitante se ha subsanado con la invención y el uso de los microscopios electrónicos.

Con un telescopio se necesitarían lentes cada vez más grandes para lograr un aumento mayor, pero, además, habría que colocarlos en órbita terrestre, como ha ocurrido con el Hubble, para obtener imágenes más nítidas y evitar distorsiones en las imágenes provocadas por el aire atmosférico. En este campo de lo muy lejano, los astrónomos y los astrofísicos cuentan ya con potentes radiotelescopios que captan y sistematizan información que, mediante ondas electromagnéticas, les llega proveniente de nebulosas y galaxias lejanas.

CARGAS ELÉCTRICAS E IMANES

Conservación de la carga

La electricidad está presente en casi todo lo que nos rodea. Tales de Mileto (624 a.C.-548 a.C.), uno de los más grandes pensadores de la antigua Grecia, observó la atracción que ejercía el ámbar sobre cuerpos ligeros después de frotarlo con pieles. Tales pensó que esta resina adquiriría un “alma” que le confería la propiedad de atraer objetos, descubriendo así la electricidad. Este nombre proviene de la palabra griega *electrón*, que precisamente significa ámbar.

ACTIVIDAD

El fenómeno que se describe en el párrafo anterior puede comprobarse frotando globos con el cabello. Note que es posible atraer trozos pequeños de papel y el efecto que tienen dos globos cargados, uno sobre otro (fig. 1).



Figura 1 | © Raúl Espejel.

Más de dos mil años 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. También llegó a la importante conclusión de que cuerpos que están cargados con el mismo tipo de electricidad se repelen, y cuerpos cargados con diferente

ACTIVIDAD

El experimento de Gray | Suspenda un popote con un hilo por su punto medio, permitiéndole girar libremente (fig. 2). Frótelo para cargarlo. Ahora frote un tubo de vidrio, acérquelo a uno de los extremos y observe qué sucede. Ahora frote otro popote y acérquelo. ¿Qué conclusiones puede obtener?

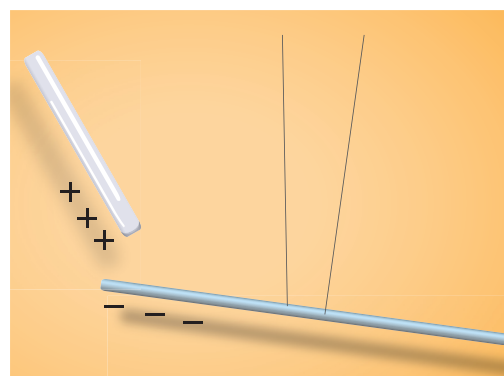


Figura 2

tipo se atraen. Eso significa que existe una fuerza entre ellos que los jala o los empuja aunque no están en contacto: esto es, ejercen una interacción a distancia.

Con el tubo de vidrio ocurre el fenómeno contrario al observado con el popote. Hay entonces dos comportamientos opuestos en el experimento que claramente dependen del material. Ambos popotes adquirieron el mismo tipo de carga, por ser del mismo material, y por lo tanto se repelieron, pero con el vidrio ocurrió lo contrario, es decir, hubo una atracción. Se puede concluir entonces que los cuerpos cargados con el mismo tipo de electricidad se repelen y los cargados con diferente tipo se atraen, como lo concluyó Stephen Gray.

Pero, ¿cómo se relaciona el hecho de frotar dos objetos con la electricidad? Se puede explicar imaginando a la materia formada por átomos, y a éstos por partículas eléctricas que siempre existen por pares; es decir, por cada negativa existe una positiva. A las partículas más pequeñas (elementales) que portan carga negativa se les llama *electrones* y a las que portan carga positiva se les llama *protones*.

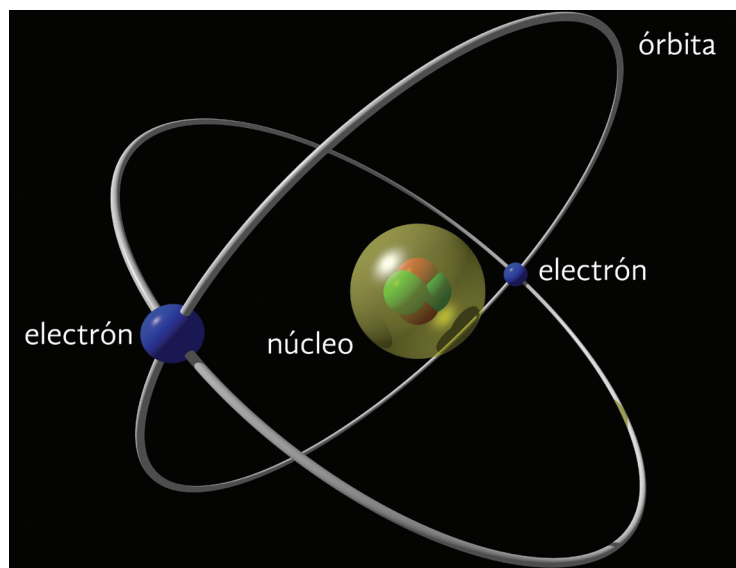


Figura 3 | © Raúl Espejel.

En el modelo atómico de la materia, los protones están concentrados en el núcleo (junto con otras partículas neutras, llamadas *neutrones*) y los electrones giran alrededor de éste. Los átomos son neutros, es decir, contienen el mismo número de electrones que de protones; además todos los átomos de un elemento tienen el mismo número de electrones (fig. 3).

Una carga neta en un átomo se logra arrancando o agregando electrones. En el primer caso se dice que el átomo está cargado positivamente y en el segundo negativamente. Todos los objetos en nuestro entorno están formados por un número increíblemente grande de átomos neutros. Para denotar ese número se tiene uno que valer de la notación en potencias de diez; así, el número de átomos en un objeto de tamaño natural tiene del orden de 10^{23} átomos (este número significa un uno seguido de 23 ceros).

En los objetos, el número de electrones es igual al número de protones, a menos que se les cargue con procedimientos similares a los descritos. Los físicos piensan que esta característica se cumple estrictamente en toda la materia del Universo.

Además, cuando se une ese enorme número de átomos, para formar un pedazo de alambre, éstos lo hacen de una manera ordenada geométricamente, forman lo que los físicos llaman una red. Por su parte, algunos electrones de los átomos vecinos se comunican, pueden intercambiar lugares y viajar a lo largo del alambre con una gran facilidad.

Otro hecho experimental importante, fundamental en la estructura del Universo, es que la carga eléctrica no puede ser destruida; siempre conserva su signo y valor.

En algunos materiales es más fácil arrancar los electrones, quedando el objeto cargado positivamente. La facilidad para perder electrones es una característica de cada material.

ACTIVIDAD

Materiales conductores y aislantes | Si se suspende de un hilo una bolita de unícel forrada de papel aluminio, y se pone en contacto con una regla metálica, al acercar un globo cargado al otro extremo de la regla se puede ver que la esfera es repelida por la regla. Si se sustituye la regla metálica por una regla de plástico, no existe tal repulsión. Se puede pensar entonces que el metal se comporta diferente que el plástico. 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 se les llama conductores, y a los que se comportan como el plástico se les llama aislantes.

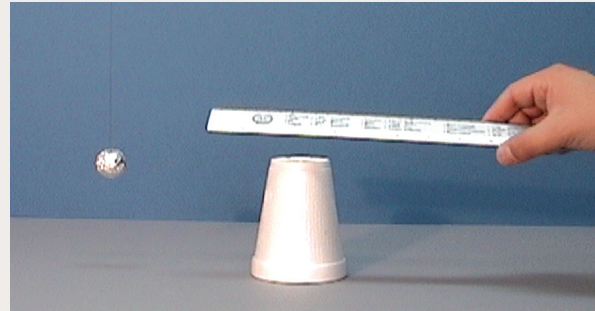


Figura 4 | © Raúl Espejel.

ACTIVIDAD

Electroscopio | Esta actividad consiste en construir un sencillo aparato que detecta su propia carga neta. Tome un rectángulo de cartón de unos 5 × 15 cm, fórralo con papel aluminio, dóblelo en forma de “L” y péglolo con cinta adhesiva en un vaso desechable. Ahora corte otro rectángulo de papel aluminio de unos 3 × 4 cm y colóquelo como se muestra en la figura 5. Frote un globo con su cabello y acérquelo a la base de la “L”; observe lo que ocurre. En un principio hay 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 y “empuja” a las del mismo signo hacia el extremo de la “L” y hacia el rectángulo de aluminio, por lo que se repele formando un ángulo (figs. 5 y 6).



Figura 5 | © Raúl Espejel.

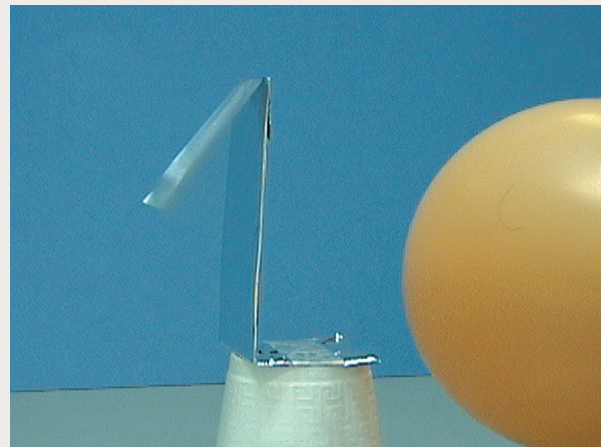


Figura 6 | © Raúl Espejel.

Acerque ahora el globo cargado al electroscopio sin tocarlo. Cuando la hoja de aluminio esté levantada tóquela momentáneamente y retire el globo. En un principio había el mismo número de cargas negativas y positivas. Como se explicó, las cargas opuestas se atraen y las cargas iguales se repelen; entonces: al acercar el globo cargado al electroscopio usted atrae las cargas positivas y se alejan las negativas, y al tocar la hoja de aluminio, estas cargas pasan a su cuerpo quedando así un exceso de cargas positivas en la “L” del electroscopio y, al estar en contacto, también con la hoja de aluminio ambas tienen el mismo signo y por lo tanto se repelen. A este fenómeno se le llama *carga por inducción*.

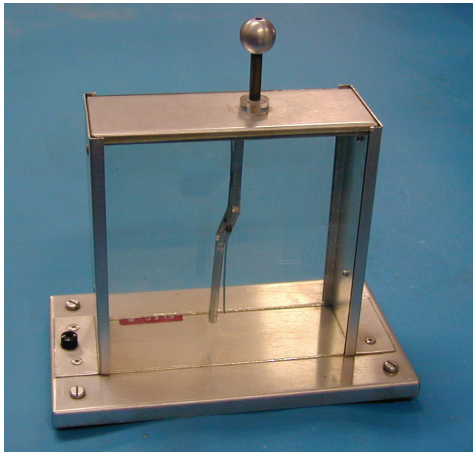


Figura 7 | Electroscopio | © Raúl Espejel.

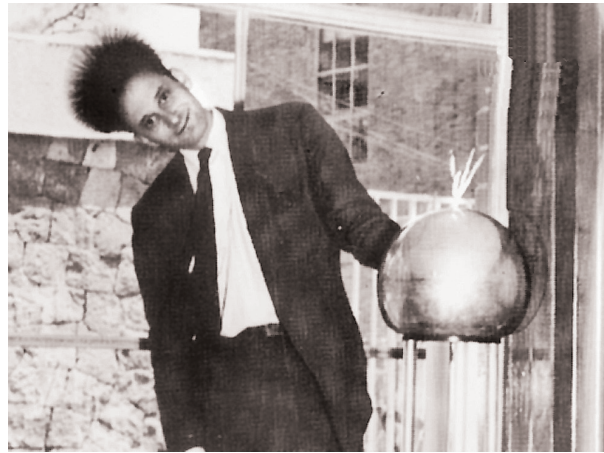


Figura 8 | Doctor Tomás Brody. | © Sociedad Mexicana de Física.

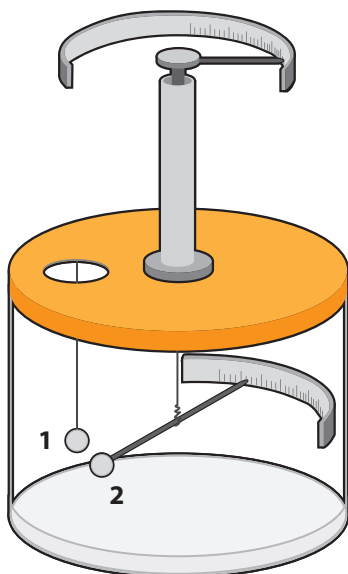
La figura 7 muestra un electroscopio comercial usado en los laboratorios para detectar la presencia de cargas eléctricas.

Existen máquinas que producen electricidad, como las llamadas generadores de Van de Graff. Consisten en una banda de hule en movimiento que frota un cepillo que la carga eléctricamente. La banda transporta su carga a una esfera hueca de metal, donde es depositada. Se pueden ver demostraciones de estos aparatos en algunos museos científicos.

La figura 8 muestra al doctor Tomás Brody (1922-1988) realizando el siguiente experimento: al igual que ocurre con el electroscopio, la bola de metal se carga eléctricamente, y al poner su mano en contacto con ella, la carga se transmite a todo su cuerpo. Al estar cargados todos los cabellos con la misma carga éstos se repelen entre sí, dando origen a que “se pongan los pelos de punta”.

Figura 9

Ley de Coulomb



El primero en realizar un estudio teórico acerca de las fuerzas eléctricas fue el físico francés Charles Coulomb (1736-1806) en 1785. Realizó su experimento con una balanza de torsión, como la de la figura 9. Cuando la esfera cargada 1 se sitúa a una distancia 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 torcido. A mayor torsión corresponde una mayor fuerza. De esta forma Coulomb podía medir la fuerza eléctrica en función del ángulo de torsión. Él concluyó que la fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas, q_1 y q_2 , en cada una de las esferas:

$$F \propto q_1 q_2.$$

Además, al mantener fijo el valor de las cargas y variar la distancia entre ellas, obtuvo que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esto se expresa matemáticamente como sigue:

$$F \propto \frac{1}{r^2}.$$

Así que, combinando ambos resultados, se obtiene que la fuerza se pueda representar matemáticamente de la siguiente forma:

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

donde k es una constante de proporcionalidad, que se determina experimentalmente y cuyo valor es:

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

En el sistema internacional de medidas la carga se mide en Coulombs (C). Note que en la *Ley de Coulomb*, si las cargas son del mismo signo, se obtiene una fuerza positiva (de repulsión) y si tienen signo diferente el resultado es una fuerza negativa (de atracción). Entonces la fuerza eléctrica tiene magnitud y dirección y a diferencia de la fuerza gravitacional, ésta puede ser repulsiva o atractiva.

Como recordará de la sección “Las interacciones entre objetos y su movimiento”, existe otra ley que varía como el inverso de la distancia al cuadrado: la *Ley de la Gravitación Universal*, que matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

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

Observe que las dos leyes tienen expresiones matemáticas similares y son ejemplos de fuerzas de acción a distancia, es decir, que los cuerpos o cargas ejercen fuerza sin estar en contacto.

Potencial eléctrico

Cuando se estira una liga, en términos físicos, se almacena en ella *energía potencial*, es decir, el trabajo que se realizó al estirla (al vencer la fuerza de restitución que es la que hace que la liga recupere su forma) queda “guardado” o se convierte en una forma de energía dentro de las partículas que forman la liga. Al soltarla, se transforma en *energía cinética*, que es la energía que posee un cuerpo al moverse.

Al existir una fuerza entre dos cargas con signo contrario, entonces, al alejarlas, en contra de la fuerza de atracción, se acumula energía potencial, ya que se realiza trabajo. También se dice que se crea una diferencia de potencial.

Se puede entender el funcionamiento de una pila eléctrica pensando en que es un dispositivo capaz de almacenar cargas de signo opuesto separadas, que por algún mecanismo (químico) fueron acumuladas en contra de la fuerza eléctrica y el trabajo realizado se transforma en energía, como ocurre en un resorte (fig. 10).



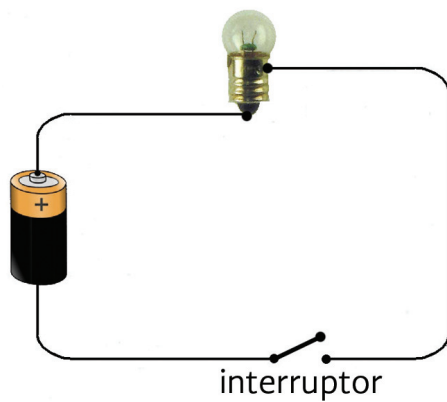
Figura 10 | © Raúl Espejel.

Nociones de circuitos simples

Como mencionamos con anterioridad, los electrones pueden moverse a través de materiales conductores, y éstos pueden adquirir energía potencial. De manera intuitiva es posible imaginar muchas partículas cargadas moviéndose juntas formando un flujo, como en el torrente de un río. Se define la *corriente* como la cantidad de carga q por cada unidad de tiempo que pasa por un punto. Entonces,

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

Figura 11 | © Raúl Espejel.



Ahora, esta corriente fluye por un material conductor, y para que exista se requiere de una diferencia de potencial en el circuito. Una linterna es un ejemplo de un circuito muy sencillo: Consiste en una batería unida con materiales conductores a un foco, como se muestra en la figura 11, donde las líneas representan alambres conductores.

Una característica de los circuitos es que en éstos siempre existe una fuente que produce un voltaje o una diferencia de potencial (pila), y los conductores forman un camino cerrado. Al apagar una linterna, se abre ese camino y deja de fluir la corriente eléctrica por el foco.

ACTIVIDAD

Arme un circuito como el de la figura 11. Los materiales son fácilmente adquiribles en una tlapalería. Retire del circuito el interruptor teniendo ahora dos cables, como se muestra en la figura 12:

Note que al unir los cables, el circuito se cierra, la corriente circula y el foco enciende. Ahora coloque entre los extremos de esos cables cada uno de los siguientes materiales y observe si el foco enciende o no. De esta manera puede clasificarlos como conductores o aislantes.

- clavo
- trozo de madera
- pedazo de papel aluminio
- pedazo de plástico
- pedazo de papel
- moneda
- pedazo de cartón
- clip
- goma de borrar

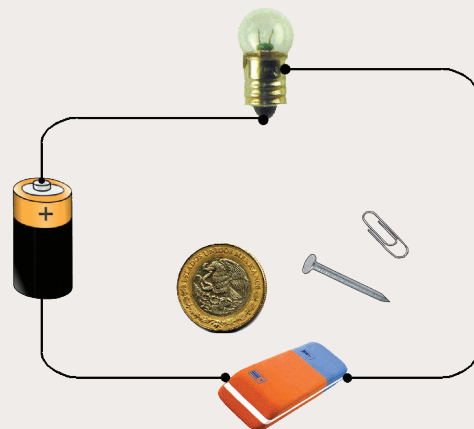


Figura 12 | © Raúl Espejel.

Campo magnético

A los 67 años, Albert Einstein (1879-1955) escribió que a los cuatro años recibió una brújula como regalo, juguete que él consideró invaluable durante toda su vida. Las brújulas tradicionales contienen una aguja metálica que siempre se orienta en la dirección nort-sur, debido al campo magnético terrestre. Este fenómeno maravilló al genio durante toda su vida.

El descubrimiento de los fenómenos magnéticos es incierto, pero se menciona que aproximadamente hace dos mil años, en la ciudad griega de Magnesia, se encontraron unas piedras de imán o magnetitas, que atraían pedazos pequeños de hierro. A ese fenómeno se le dio el nombre de magnetismo.

Si se acercan dos imanes de barra, de manera que ambas puntas se atraigan, al voltear uno de ellos se observa que se repelen y tienden a orientarse uno con el otro.

ACTIVIDAD

Imante un clip frotándolo con un imán y colóquelo sobre un pedazo de unicel a modo de flotador. Coloque ambos en un recipiente con agua (fig. 13): observará que se orienta espontáneamente en una dirección. Es lo mismo que sucede con los imanes de barra, sólo que ahora se tiene un imán enorme que orienta al clip: la Tierra. En cualquier región de la Tierra, la aguja imantada se orienta debido al campo magnético terrestre y apunta de Norte a Sur.

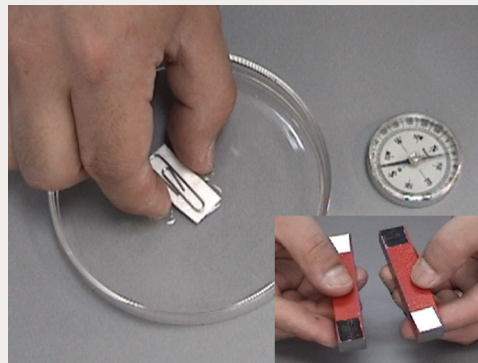


Figura 13 | © Raúl Espejel.

En el siglo XI se descubrió que una aguja imantada montada libremente se orientaba, por lo que se puede concluir que 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. Sin embargo, la primera referencia escrita del uso de la brújula por los chinos data del siglo XI. Otro dato histórico es que los árabes mencionan por primera vez la brújula en 1220. Probablemente fueron ellos quienes la introdujeron en Europa, donde no tardó en ser adoptada por los vikingos.

Generación de un campo magnético por una corriente eléctrica

En el año de 1820, Hans Oersted (1777-1851) realizó un experimento para demostrar a sus alumnos que las cargas en movimiento y los imanes no interactuaban. El experimen-

to 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 comenzó a moverse hasta que se orientó perpendicularmente al alambre.

Lo que sucedió fue que, hasta ese momento, Oersted siempre había realizado el experimento poniendo el alambre perpendicularmente a la aguja de la brújula, por lo que no había observado ningún movimiento en la aguja dado que ya estaba orientada. Cuando lo realizó frente a sus alumnos, puso por casualidad el alambre y la aguja de la brújula paralelos, y entonces notó el efecto: al formar un ángulo diferente de noventa grados, la brújula se orienta perpendicularmente al alambre, tan pronto fluye por él una corriente.

Con este experimento se demuestra que una corriente eléctrica (la cual es un flujo continuo de cargas eléctricas en movimiento) genera un campo magnético. Más tarde, André Ampère (1775-1836) demostró que el polo norte de la aguja de la brújula se desvía siempre a la izquierda de la dirección que lleva la corriente.

Generación de una corriente eléctrica por un campo magnético

Al igual que una corriente eléctrica genera un campo magnético, también un campo magnético en movimiento puede generar una corriente eléctrica. La electricidad que llega a las casas se genera de esta manera, pero a una escala mucho mayor; es decir, dependiendo de la tecnología de la planta, algún mecanismo hace girar grandes imanes cerca de bobinas, lo que produce una corriente eléctrica.

TEMPERATURA, CALOR Y ENERGÍA

En esta sección trataremos conceptos de física relacionados con la temperatura, el calor, la energía interna (también llamada “térmica”) y el trabajo mecánico. Estos conceptos, como la mayoría de los tratados anteriormente, están asociados a fenómenos importantes de la vida cotidiana, la industria, el transporte y la generación de electricidad. Además, forman parte importante de problemas de gran relevancia de nuestro tiempo; un ejemplo es el aumento continuo de la temperatura de nuestra atmósfera, conocido como “calentamiento global”.

En el hogar se realizan regularmente acciones que requieren del aumento de la temperatura del agua, como la cocción de alimentos, el calentamiento de agua para el aseo, el lavado de ropa y utensilios de cocina. Ello se logra aumentando su energía por medio de calor, obtenido quemando gas o leña, por ejemplo. También, para mantener los comestibles en buen estado es necesario el proceso contrario, el de enfriamiento. En este caso se utilizan los refrigeradores que funcionan por medio de la corriente eléctrica que proviene de la red.

La mayor parte de los aparatos domésticos, como el refrigerador, la plancha, las lámparas de las habitaciones, así como los dispositivos empleados en la recreación, y tantos otros más, funcionan con la energía producida en las plantas generadoras de electricidad. El mayor porcentaje de la electricidad que se genera proviene de plantas que queman gas, petróleo o carbón, lo que trae como resultado un incremento de la emisión hacia la atmósfera de gases llamados de efecto invernadero. Un ejemplo es el dióxido de carbono que es, entre otros, el causante del calentamiento global del planeta.

Otros contaminantes del aire provienen de la quema de combustibles fósiles usados en el transporte y en las industrias. Esto ocasiona la liberación a la atmósfera de gases perniciosos como el dióxido de carbono y los óxidos de nitrógeno o azufre, que además provocan la acidificación de las aguas y los suelos.

Por lo anterior, un gran problema de nuestro tiempo es la generación de energía por fuentes que no sean contaminantes ni agotables, como las actuales. Estas fuentes de energía renovables son las que provienen de manera directa (fotovoltaica, concentradores solares) o indirecta (eólica, hidro, biomasa) del Sol, además de la geotermia.


La escala de los objetos asociados al funcionamiento de las plantas generadoras de electricidad, a los vehículos de transporte de personas, a los procesos industriales en las fábricas, corresponde a tamaños de escala humana. Es decir, se trata de dimensiones entre lo microscópico y lo macroscópico. Otra característica esencial de estos objetos—como por ejemplo, el agua contenida en una olla— es que están formados por una cantidad extraordinariamente grande de átomos y moléculas.

De aquí en adelante se denominarán como *objetos termodinámicos* a aquellos de escala humana.

Interacción térmica entre objetos termodinámicos

Ejemplos sencillos de objetos termodinámicos son un cubo de hielo recién sacado del refrigerador y el aire del cuarto de la cocina.

ACTIVIDAD


 Tome con su mano un cubo de hielo del refrigerador, póngalo sobre un plato y observe lo que sucede. ¿Qué está “más frío” según su mano: el hielo o el aire de la cocina?

Al cabo de varios minutos notará que el cubo de hielo disminuye de tamaño, mientras se va formando un pequeño charco de agua a su alrededor. Después de un rato el cubo se habrá derretido completamente y sólo habrá agua en el plato. Si se espera un tiempo aún mayor, el agua desaparecerá completamente.

Todos los cambios experimentados por el cubo de hielo son debidos a su interacción con el aire de la cocina, por la diferencia de temperatura entre ambos. A ésta se le llamará interacción térmica.

- ¿Qué fue lo que determinó los cambios sufridos por el cubo de hielo?

ACTIVIDAD

 Coloque una olla con agua sobre la flama de una hornilla de la estufa. Al momento de prender la flama introduzca uno de sus dedos en el agua, usándolo como termómetro. Haga lo mismo un poco después. ¿Qué nota? ¿Subió la temperatura del agua?

La interacción que se establece entre la flama de la hornilla y la olla con agua es también una interacción térmica. Los gases de la flama están a una temperatura superior que la del metal de la olla y del agua dentro de ella.

Siempre que las temperaturas de dos cuerpos u objetos sean diferentes, y no haya entre ellos una pared especial que los aisle, los cuerpos interactúan térmicamente entre ellos. Esto quiere decir que sus temperaturas iniciales se alteran como resultado de la interacción. Por ahora se entenderá por *temperatura* la sensación de “calentamiento” que se siente al utilizar un dedo o la mano como “termómetro”.

¿Qué tipo de pared y de qué material puede impedir la interacción térmica entre: el cubo de hielo y el aire de la cocina, la olla de metal con agua y la flama de la hornilla, su mano y el asa de la olla de metal? Al tipo de pared que impide la interacción térmica entre dos objetos se conoce como *pared adiabática*. Ella puede ser rígida, como una lámina o placa hecha de asbesto, o flexible, como un guante de tela.

- ¿Qué pared adiabática es mejor: la placa de asbesto o el guante de tela?
- ¿De qué materiales están hechas las paredes que permiten la interacción térmica?
- ¿Cómo se las denomina?

En el caso de la flama de la hornilla y el agua dentro de la olla, la pared que permite su interacción térmica es la lámina de metal o de barro de que está hecha la olla y se le llama *pared diatérmica*.

- ¿Qué pared diatérmica es mejor: el metal o el barro?

Observe, sin embargo, que la interacción térmica entre dos objetos puede darse sin que exista pared de por medio, como entre la olla y la mano, o en la actividad anterior entre el cubo de hielo y el aire “caliente”.

Si lo que ahora se quiere es conservar el mayor tiempo posible la temperatura de algo caliente, como una taza de chocolate: ¿qué haría, ¿rodearía la taza de paredes adiabáticas o diatérmicas? O, si lo que quiere es gozar del sabor de su paleta helada el mayor tiempo posible, sin que se derrita, ¿qué se puede hacer? ¿Cómo puede “enfriar” lo más rápidamente posible un objeto “caliente”?

Como verá más adelante, los procesos de enfriamiento y calentamiento rápido de objetos son esenciales en el buen funcionamiento de las plantas generadoras de electricidad.

La temperatura y su medición

Al hacer referencia al cambio que experimenta el agua en una olla que se somete a la flama de una hornilla, se dice que el agua “se calienta”. En realidad, lo que científicamente significa, es que la temperatura del agua aumenta cuando se somete a una interacción térmica con la flama de la hornilla.

A la inversa, al referirse a que un cuerpo “se enfría”, científicamente significa que su temperatura disminuye.

La mayoría de los materiales de que están compuestos los objetos del mundo que nos rodean tienen esta propiedad: aumentan sus dimensiones (longitud, superficie o volumen) cuando su temperatura aumenta, o las disminuyen cuando su temperatura disminuye. Es esta propiedad la que sirve para diseñar y construir un termómetro, es decir, un aparato para medir la temperatura.



Figura 1 |
Termómetro de mercurio.

En la figura 1 aparece un termómetro de mercurio, muy parecido a los que se emplean para medir la temperatura corporal y saber si se tiene o no “calentura”. El mercurio es una sustancia que se dilata notoriamente al subir su temperatura, de ahí la preferencia para emplearlo en los termómetros. El cambio en el volumen del mercurio contenido en el bulbo, al ponerlo en contacto con un objeto de temperatura diferente, hace que se manifieste de manera notable en la altura de la columna del tubo capilar.

El termómetro de la figura 1 está calibrado de 0 a 100 grados centígrados. El termómetro se calibró al nivel del mar, utilizando agua en dos estados físicos. El primer estado físico, correspondiente al 0, es el llamado *punto de congelación del agua*. Al segundo estado físico, denominado *punto de ebullición del agua*, se le asigna el número 100. En seguida se divide el intervalo de 0 a 100 en cien partes iguales. A cada parte se le llama un grado Celsius de temperatura (representado por °C). Esta escala recibe el nombre del científico sueco Anders Celsius (1701-1744), quien la construyó cerca del año de 1742.

Equilibrio térmico


De la discusión anterior, es importante hacer las tres observaciones siguientes.

En primer lugar, se dijo que el experimento de calibración se realizó al nivel del mar. Esto quiere decir que si la calibración se efectúa, por ejemplo, a la altura de la ciudad de México, la longitud que alcance la columna de mercurio en el punto de ebullición será diferente a la longitud a la que antes llegaba en Acapulco. El resultado es que si se lee la temperatura del punto de ebullición del agua en la ciudad de México, con un termómetro calibrado en Acapulco, será de unos 95°C .

La segunda observación es que cuando dos objetos a diferente temperatura entran en contacto a través de una pared diatérmica, sus temperaturas cambian hasta que alcanzan el *equilibrio térmico*. En ese momento las temperaturas de los objetos llegan a tener el mismo valor, si bien diferente de sus temperaturas iniciales. Tal es el caso del agua en la olla, que primeramente se calienta con la flama de la hornilla y luego se deja enfriar, apagándola. Al cabo de un tiempo las temperaturas del agua, la olla y el aire de la cocina llegan a igualarse, alcanzándose finalmente el estado físico del equilibrio térmico entre los tres objetos.

El tercer aspecto a reconsiderar es lo que sucede en los puntos de congelamiento y de ebullición del agua. Es importante notar que, en el punto de ebullición, el agua líquida y el vapor que se genera, siempre están a la misma temperatura; lo que sirvió para calibrar el termómetro. Mientras haya agua hirviendo, habrá equilibrio térmico entre el líquido y el vapor. Algo semejante se presenta en el punto de congelamiento del agua, pues mientras haya hielo, su temperatura y la del agua derretida serán la misma. Este comportamiento del agua permitió fijar el segundo punto de calibración del termómetro de mercurio.

ACTIVIDAD

 Toque con sus manos los diferentes objetos que hay en la cocina y agrúpelos según sienta la temperatura a la que están. ¿Es la temperatura de los diversos objetos igual o diferente entre ellos?

En relación con la primera actividad, ¿qué le pasa a la temperatura del agua derretida, una vez que el hielo en el plato ha desaparecido completamente?

Imagine ahora que, en la cocina de su casa, las hornillas no están encendidas, ni la puerta del refrigerador está abierta, y mida con un termómetro la temperatura de los objetos que hay en la cocina (platos de cerámica, plástico y metal, mesa de madera, vasos de vidrio y plástico, cuchillos, tenedores y cucharas). ¿Sería la temperatura de los diversos objetos igual o diferente entre ellos?

Calor, trabajo y energía interna

En la segunda actividad, al aplicar la flama a la olla con agua, observó que la temperatura del líquido aumentó. Es decir, la interacción térmica entre la flama y el agua, a través de la pared de metal de la olla, hizo que la temperatura del agua se incrementara.

- ¿Qué es lo que hay “detrás” de la interacción entre la flama y el agua que hace que el agua se “caliente” y que su temperatura aumente?


Y, cuando cerró la llave del gas y apagó la hornilla, ¿qué le sucedió al agua? Luego de un rato se observa que la temperatura del agua vuelve a bajar al valor que tenía, antes de que la flama incremente su temperatura. Esto quiere decir que está sucediendo “algo” entre dos o más objetos a diferentes temperaturas, cuando se los deja que interactúen térmicamente. Al medir la temperatura de un objeto con un termómetro de mercurio se presenta la misma interrogante:

- ¿Qué sucede “detrás” de la interacción entre el mercurio contenido en el bulbo del termómetro y, por ejemplo, el agua caliente de la olla donde se le sumerge? ¿Hay “algo” que se intercambia, como consecuencia de la interacción térmica?

El mercurio del bulbo, que al inicio estaba a la misma temperatura que el aire de la cocina, al entrar en contacto con el agua caliente se dilata y entonces sube por el tubo de vidrio manifestando un aumento en su temperatura. Cuando la columna de mercurio ya no sube más, el bulbo y el agua alcanzan el equilibrio térmico, y el mercurio en el tubo llega a la marca de la temperatura del agua caliente.

Puede llevar a cabo la siguiente actividad bien con un termómetro de laboratorio o con un termómetro clínico de mercurio.

ACTIVIDAD

 Introduzca un termómetro en una olla con agua y observe cómo sube la columna de mercurio del termómetro, al prender la hornilla. Si el termómetro que utiliza es un termómetro clínico, suspenda la medición antes de que la columna de mercurio alcance el extremo superior.

Es necesario ampliar el conocimiento que se tiene hasta ahora de las interacciones térmicas e introducir nuevos conceptos que ayuden a entender, con más profundidad, lo que físicamente está sucediendo durante tales interacciones. Esto nos permitirá responder científicamente a preguntas como las dos anteriores.

Para lograrlo hay que apoyarse en nuevas experiencias, como las que en la historia de la ciencia y la tecnología se registran, y dieron origen a los conceptos de *calor*, *energía interna* y *trabajo*.

El motor térmico

Los tres conceptos anteriores empiezan a aparecer de manera interrelacionada a partir del estudio del funcionamiento de los *motores térmicos*. Estos aparatos son dispositivos técnicos capaces de provocar efectos sorprendentes. Por ejemplo, de la quema de un combustible se puede conseguir la elevación de un cuerpo pesado. Pero, también sorprendentemente, los procesos involucrados en su funcionamiento son semejantes a los procesos que hasta ahora se han descrito en las actividades.

En la figura 2 (p. 130) se puede ver uno de tales motores térmicos, el de Newcomen, desarrollado en el siglo XVIII con el fin de extraer agua y carbón de las minas de este mineral.

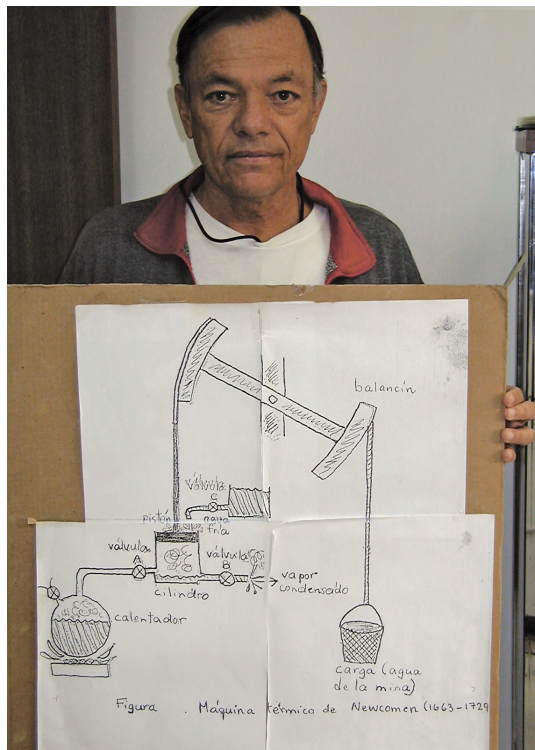


Figura 2 | © Raúl Espejel.

Su funcionamiento es el siguiente: en la parte izquierda se quema carbón en la caldera. La flama resultante hace hervir el agua dentro del contenedor, cuyo vapor entra a un cilindro de hierro provisto de un pistón. La entrada de vapor eleva el pistón haciendo que el balancín gire hacia la izquierda bajando el balde. En un segundo paso el cilindro es enfriado por la caída de agua de otro contenedor, lo que provoca que el vapor dentro se condense convirtiéndose en agua; esto obliga a que la presión dentro del cilindro disminuya, por lo que el balancín gira ahora en la dirección contraria, y el balde sube a una cierta altura. Acto seguido entra de nuevo vapor de agua proveniente de la caldera y el proceso se repite, cíclicamente.

Se puede construir en casa o en el laboratorio de la escuela un motor térmico sencillo empleando objetos de uso cotidiano. Para ello se necesita una lata de refresco, barro o plastilina epóxica, la tapa de metal de un frasco, alcohol, un popote, un rehilete, una rondana, hilo y un objeto que pese unos cuantos gramos. En la figura 3 se puede apreciar el arreglo de los objetos mencionados.



En estos motores suceden varios procesos, que son muy parecidos.

En los extremos izquierdos se quema combustible: carbón en el motor de Newcomen y alcohol en el motor térmico casero. En ambos motores, los gases —producto de la combustión— se liberan directamente a la atmósfera de modo que, si no se pone un filtro, el aire se contamina.

En los extremos derechos, en el motor casero se termina subiendo un pequeño cuerpo de masa m , hasta una altura h , en tanto que en el motor de Newcomen se eleva una carga, representada en la figura 2 por una cubeta. Este recipiente contenía agua o carbón que se extraía del interior de las minas.

En las partes intermedias del motor térmico casero el vapor generado dentro de la lata de refresco por la combustión del alcohol es liberado por el popote hacia el exterior,

donde incide sobre un rehilete. El giro continuo del rehilete es aprovechado para subir la carga de masa m .

En una planta generadora moderna de electricidad (o termoeléctrica), el rehilete es una turbina de varias toneladas que, al girar acoplada a un generador, produce electricidad. En la caldera se pueden quemar combustibles fósiles como carbón, gas o petróleo.



Figura 4 | Planta termoeléctrica.

Formas de energía y el principio de conservación de la energía

Note ahora lo que ambos motores ocasionan en el extremo derecho: al subir el cuerpo de masa m a una altura h , han conseguido que la energía potencial gravitacional del cuerpo aumente. Y ambos, a partir de la quema de combustible del lado izquierdo, consiguen ese importante efecto. Esto envía el mensaje claro de que el combustible debe contener algo que, al quemarse, se convierte en energía gravitatoria de un cuerpo del lado derecho. A ese “algo” que está en el alcohol o en el carbón, capaz de producir una energía potencial gravitatoria del lado derecho, también se le llama energía. Sin embargo, es de naturaleza diferente a la gravitatoria, y se le llama *energía química*.

Observe que cuando el alcohol se quema y se destruye, su energía aparentemente desaparece; pero no es así, porque en los procesos subsiguientes del motor térmico esa energía se va transformando de una forma en otra, hasta llegar a convertirse en energía gravitatoria.

Ahora, si al cuerpo de masa m , que está a la altura h y, por lo tanto, tiene una energía gravitatoria mayor que la que tenía antes (al nivel del suelo), se le deja caer sobre la cabeza de un clavo, cuya punta se apoya en una tabla de madera, el clavo se hundiría en la madera, venciendo la *fuerza de resistencia* de la madera. Si el clavo se hunde una distancia d , decimos que se ha realizado un trabajo dado por el producto de la fuerza de resistencia de la madera por la distancia de penetración. Escrito en forma matemática:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza por la distancia en que la fuerza actúa.}$$

Como el trabajo realizado en contra de la fuerza de resistencia de la madera fue ocasionado por la energía potencial gravitatoria del cuerpo, se dice con frecuencia y de manera muy general, que:

$$\text{La energía es la capacidad para hacer trabajo.}$$

Desde luego, una definición amplia y abstracta de la energía como la anterior puede decir poco, a menos que se la refiera a una situación concreta como la analizada en el motor térmico. Note la gran diferencia que hay entre la energía química del combustible del lado izquierdo del motor térmico, y la energía potencial gravitatoria del objeto de masa m , que se eleva a una altura h , del lado derecho.

La energía química del combustible se puede transportar junto con el combustible. La energía va para donde vaya el combustible; se trata, pues, de una energía contenida en el objeto y, por ello, se la llama *energía interna*.

En cambio, la energía potencial gravitatoria del cuerpo u objeto de masa m aumenta o disminuye en relación con la altura h a la que se encuentre del suelo. Se trata de una energía relativa a la posición de un objeto con respecto a otro, que es exterior a él. La energía gravitatoria no es una energía que tenga que ver con el interior del objeto.

La energía química del combustible es una energía de tipo termodinámico, mientras que la energía gravitatoria es de tipo mecánico. Pero el motor térmico convierte una en otra. Así que este motor térmico es capaz de convertir o transformar la energía química contenida en un combustible en energía gravitatoria de un cuerpo de masa m ; pero, ¿qué otras formas de energía se presentan en los pasos intermedios?

En la combustión del alcohol o del carbón se generan gases a alta temperatura, a los que también se les puede adjudicar una cierta energía interna. La interacción de los gases calientes de la flama con el contenedor y luego la interacción de éste (que es metálico) con el agua de su interior, hacen que el agua aumente su temperatura y su energía interna.

En adelante se dirá que fue por *calor* el aumento de la energía interna del agua, y que dicho calor fue ocasionado por la interacción térmica del agua con la flama. También se dirá que la flama se *desenergiza*, es decir, que disminuye su energía interna por calor.

Por lo anterior suele decirse que: *calor es energía en tránsito*.

Una observación importante referente a las maneras propias de hablar científicamente es la siguiente: tiene significado físico hablar de la temperatura o de la energía interna de un objeto, pero no tiene sentido la frase “el calor en un cuerpo”. El calor se presenta en un proceso cuando cambia la energía interna de un objeto, al interactuar térmicamente con otro. Pero no significa que “una cantidad de calor pase de un cuerpo a otro”.

En el caso de la olla con agua caliente, que se enfría al interactuar térmicamente con el aire de la cocina, la olla disminuye por calor su energía interna (y también su temperatura), en tanto que el aire del cuarto la aumenta (y también, aunque muy poco, su temperatura), mientras dura el proceso de la interacción térmica.

El proceso de interacción termina cuando la olla y el aire del cuarto alcanzan el equilibrio térmico, situación a partir de la cual los procesos de energización y desenergización por calor del aire del cuarto y la olla también cesan. Al llegar los dos objetos al equilibrio térmico, el calor, como energía en tránsito, desaparece. Lo que subsiste son las energías internas del agua de la olla y del aire de la cocina, disminuidas o aumentadas.

En un paso siguiente dentro del motor térmico, el vapor entra al cilindro e impulsa al pistón hacia arriba. Como consecuencia, la energía interna del vapor disminuye, y es este cambio el que se transforma en trabajo gravitatorio al elevar el pistón.

En general, el trabajo es una energía que se desarrolla por la acción en contra de una fuerza; en este caso, la de gravedad que atrae al émbolo hacia el centro de la Tierra.

La disminución de la energía interna del vapor se transforma en el trabajo mencionado. E incluso se invertiría en un segundo trabajo si considerásemos la fuerza de fricción que ejercen las paredes del cilindro en contra del movimiento del émbolo.

Tomando en cuenta lo anterior, se acepta que *la energía no se destruye sino sólo se transforma*. Este principio de conservación de la energía nos obliga a hacer el balance siguiente:

Cambio en la energía interna del vapor = trabajo gravitatorio del émbolo + trabajo de fricción.

Al igual que con el calor, tampoco se puede hablar del “trabajo en un cuerpo”. Ni el calor ni el trabajo son propiedades, características de los objetos, más bien se refieren a energías de procesos de interacción entre dos o más cuerpos.

El calor es energía en tránsito debido a que hay una diferencia de temperatura (un desequilibrio térmico) entre dos (o más) objetos. El trabajo es también una energía en tránsito generada por la interacción dinámica debida a una fuerza desequilibrada entre dos objetos. Ambos, calor y trabajo, son dos maneras distintas de cambiar la energía interna de un objeto.

Si se observa con más detenimiento lo que ocurre energéticamente con el vapor caliente que recién acaba de entrar al cilindro, se advierte que:

- a) se producen los dos trabajos: de elevación del émbolo y de fricción entre el émbolo y las paredes del cilindro.

Además,

- b) hay una interacción térmica del vapor caliente con el aire circundante. Esta interacción térmica también causa una disminución de la energía interna del vapor del cilindro, ahora por calor.

Haciendo la cuenta completa de en qué se convierte el cambio de la energía interna del vapor, y basándose en el principio de conservación de la energía, se podría afirmar que:

Cambio total de la energía interna del vapor = cambio por trabajo + cambio por calor.

Esta ecuación es la llamada *Primera Ley de la Termodinámica*. Aquí se la ha enunciado para el caso del cambio en la energía interna del vapor en el cilindro del motor térmico, pero es una ley que es válida también para el cambio en la energía de cualquier objeto termodinámico.


La ecuación anterior es una expresión del mencionado principio de conservación de la energía que, en forma general, establece que:

La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

Al cambio de la energía interna por calor se le suele representar generalmente con la letra Q , mientras que al cambio en la energía interna por trabajo se le denota con la letra W . Con estas denominaciones la ecuación de la *Primera Ley de la Termodinámica*, enunciada para cualquier objeto, se lee:

Cambio total en la energía interna de un objeto = $Q + W$.


ACTIVIDAD

 Aplique la ecuación de la *Primera Ley de la Termodinámica* al agua dentro de la olla expuesta a la flama de una estufa.

¿Por qué aumenta la temperatura de un trozo de carne dentro de un horno de microondas: por calor o por trabajo, o por ambos?

Las transformaciones energéticas en el motor térmico casero podrían analizarse de manera semejante a las del motor de Newcomen.

ACTIVIDAD

 Aplique la ecuación de la *Primera Ley de la Termodinámica* a todos los procesos que ocurren en el motor térmico casero.

Si regresa a las preguntas que se hacían sobre si, en las interacciones de la flama con la olla de agua, y entre el mercurio del bulbo del termómetro al contacto con agua caliente, habría “algo” que hacía que las temperaturas tanto del agua como del mercurio subieran, ¿qué respondería ahora?

La respuesta sería que, como resultado de la interacción térmica cambian las energías internas del agua de la olla y del mercurio del bulbo, por calor.

El cambio en la energía interna de un objeto debido a una interacción térmica, es decir, por calor, implica generalmente un cambio en su temperatura. Si la energía interna aumenta, así será también con su temperatura, y a la inversa.

Medida del calor

El calor, la energía en tránsito entre dos o más objetos debido a su interacción térmica, tiene una unidad de medida al igual que cualquier otra cantidad en física.

El trabajo, como se vio en el tema de “Las interacciones entre objetos y su movimiento”, se medirá por el producto de una fuerza actuando sobre una distancia. Si las unidades en que se mide la fuerza son newtons (N) y la distancia son metros (m) en el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de energía será el joule (J):

$$J = N \times m.$$

La unidad tradicional del calor es la caloría, que se define de la siguiente manera:

1 caloría es la energía necesaria para aumentar, por calor, la temperatura de 1 gramo de agua de 14.5 °C a 15.5 °C.

La equivalencia de la caloría (que se abreviará como cal) con la unidad mecánica de energía, el joule, se puede calcular mediante el siguiente experimento sencillo: en un vaso de unicel con agua a 14.5 °C se sumerge un alambre de resistencia eléctrica conocida, por el que circula una corriente de valor también conocido. Se mide el tiempo necesario para que la temperatura del agua suba un grado centígrado. En un experimento típico, se tiene que, para un voltaje de 110 V, una corriente de 250 mA, es necesario calentar 100 g de agua durante 15 s. Con estos valores, se obtiene que:

$$1 \text{ cal} = 4.185 \text{ J}.$$

- ¿Por qué el vaso tiene que ser de unicel para realizar el experimento anterior?

Propiedades térmicas de las sustancias. Capacidad térmica

Se sabe que, generalmente, un objeto eleva su temperatura cuando aumenta su energía interna por calor. Al cociente de la cantidad de calor Q involucrado entre el aumento de temperatura, se le conoce como la *capacidad térmica* de la sustancia.

$$\text{Capacidad térmica} = \frac{\text{calor procesado}}{\text{incremento de temperatura}}.$$

Si la capacidad térmica se representa por la letra C , el calor por Q y el cambio de temperatura por Δt :

$$C = \frac{Q}{\Delta t}.$$

Si se duplica la masa de la sustancia, manteniendo el mismo valor de Q , lo que experimentalmente se observa es que el aumento de temperatura se reduce a la mitad. Esto significa que la capacidad térmica se ha duplicado, es decir que la capacidad térmica de una sustancia es proporcional a su masa.

No obstante, el cambio de temperatura es diferente para un gramo de agua que para un gramo de hierro, aunque ambos objetos sean de igual masa y energizados por la misma cantidad de calor. El aumento de temperatura de un gramo de hierro es unas diez veces mayor que el aumento de temperatura de un gramo de agua. Es decir, la capacidad térmica de un gramo de agua es unas diez veces mayor que la capacidad térmica de un gramo de hierro.

La *capacidad térmica específica* de una sustancia se refiere a la masa de un gramo y se representa por c :

$$c = \frac{C}{m},$$

donde m es la masa de la sustancia expresada en gramos.

Los valores de las capacidades térmicas específicas permiten hacer una mejor comparación entre las propiedades térmicas de las sustancias, ya que sus capacidades térmicas se refieren a cualquier cantidad de masa.

Entre las sustancias de uso común, el agua es la que tiene mayor capacidad térmica específica, que es de 1 caloría/g°C. La correspondiente al hierro es de 0.11 caloría/g°C.


¿Cómo expresa matemáticamente, dados los valores de las capacidades térmicas específicas del hierro y del agua, que ante la misma energización por calor, la temperatura de 1 g de hierro suba nueve veces más que la temperatura de 1 g de agua?

La gran capacidad térmica específica del agua es la responsable de que no varíe demasiado la temperatura de los lugares cercanos a las grandes masas de agua. Por ejemplo, si varía la temperatura del aire circundante al hacerse de noche, el agua de un lago intercambiará energía por calor con el aire, contribuyendo a mantener la temperatura que tenía durante el día, sin que la temperatura del agua del lago varíe mucho.

En la siguiente tabla (p. 136) se dan los valores de las capacidades térmicas específicas de algunas sustancias.

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

ACTIVIDAD

 Vierta en un vaso grande de unícel 50 mililitros de agua a 40 °C y en seguida 30 mililitros más de agua, también a 40 °C. ¿Qué temperatura espera que tenga la mezcla de agua?

Ahora vierta en un vaso grande de unícel 50 mililitros de agua a 40 °C y en seguida otros 30 mililitros de agua, ahora a 60 °C. ¿Qué temperatura espera que tenga la mezcla de agua?

Si ahora deposita un trozo de hierro de 100 g a 60 °C, en un vaso de unícel que tiene 100 g de agua a 30 °C, ¿qué temperatura alcanzarán el agua y el hierro?

¿Cuántas calorías debe aumentar por calor la energía interna de 25 g de agua para elevar su temperatura 4 °C?

Para que esto suceda, cada gramo de agua debe aumentar su energía interna por calor en 4 cal. Puesto que hay 25 gramos de agua en total, se tendrá que aumentar la energía interna en $25 \times 4 = 100$ cal.

Cambios de fase

Existen situaciones en que la interacción térmica de un objeto con otro no se traduce necesariamente en el aumento de temperatura de uno de ellos. Tal es el caso del agua en una olla, cuando alcanza la temperatura del punto de ebullición.

A pesar de que el agua sigue recibiendo energía de la flama por la interacción térmica, su temperatura se estaciona en el valor de ebullición 100 °C.

Entonces, ¿en qué se invierte la energía que el agua recibe de la flama? Se invierte en la transformación del agua en vapor, hasta que todo el líquido desaparece.

La energía que, por calor, tiene que aumentar un gramo de agua para evaporarse completamente se llamaba antiguamente *calor latente de evaporación del agua*. Se representa por L_{evap} y tiene el valor de 540 cal/g.

$$L_{\text{evap}} = 540 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$$

Algo semejante ocurre en la transformación del cubo de hielo en agua. Mientras el hielo se va derritiendo por recepción de energía por calor del aire, su temperatura no cambia de 0 °C. Al incremento de energía, por calor, necesaria para derretir un gramo de hielo, se le llama *calor latente de licuefacción*; se denota por L_{lic} y tiene el valor de 80 cal/g.

$$L_{\text{lic}} = 80 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$$

El agua puede presentarse en tres estados físicos llamados *fases*: sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor). Si se tiene agua en su fase líquida se le puede convertir en fase sólida por refrigeración, o convertirla a la fase gaseosa calentándola hasta hervir.

El ciclo del agua

Un aspecto básico del desarrollo sustentable es que los ciclos naturales de sustancias clave, como son el agua, el carbono, el nitrógeno y varias más, se mantengan sin perturbaciones que los alteren e impidan desempeñar su función en el mantenimiento de las condiciones generales de vida del planeta.

La cantidad total del agua en la Tierra es constante, no así su pureza. El 90.4% del agua se encuentra en fase líquida en los mares (1 370 millones de kilómetros cúbicos); 8.9% del agua está en fase sólida, en los hielos y en la nieve; 0.68% en fase líquida, subterránea; 0.01% en lagos; 0.005% en humedad del suelo; 0.001% en la atmósfera, como vapor de agua; 0.0001% en arroyos y ríos; y 0.00004% en la biomasa.

El Sol provoca que el agua del mar se evapore, se formen nubes, llueva y después esa misma agua regrese al mar por ríos o por la misma lluvia. Parte de ella queda atrapada en lagos y mantos subterráneos. O puede caer en forma de nieve y después formarse hielo, que eventualmente puede derretirse y regresar al mar como agua o como desprendimientos de hielo.

En todas las partes del ciclo, el agua se contamina constantemente por emisiones, quema de combustibles, drenajes urbanos o de las industrias, así como del riego agrícola industrializado. ¿Conoce algún cuerpo de agua, fijo o fluyente, que antes no haya estado contaminado y ahora lo esté?

ACTIVIDAD

Enumere los contaminantes de los cuerpos de agua por su impacto y en orden de importancia.

- ¿Cuáles son las leyes mexicanas que protegen al agua de la contaminación?

ACTIVIDAD

Haga un listado de las posibles acciones que, en lo individual, se pueden ejercer para prevenir la contaminación del agua en su entorno.

Ciclo del carbono

El carbono de la atmósfera y las plantas terrestres y marinas mantienen un balance equilibrado en el planeta. Las plantas terrestres, por ejemplo, tienen dos ciclos derivados de la fotosíntesis. En el ciclo corto, las plantas absorben carbono para fabricar su alimento durante el día y liberan parte de éste por la noche, dando un balance positivo a favor de la planta porque la mayor parte del carbono se transforma en biomasa que forma parte de la planta.

En el ciclo largo, el carbono que la planta acumuló a lo largo de su vida es regresado al ambiente después de su muerte, para un balance neto de cero si se considera que el carbono que desprende la planta al morir es tomado por otras plantas jóvenes que necesitan crecer y desarrollarse.

Pero el carbono en la atmósfera puede perder su ciclo si los bosques, o las plantas en general, se destruyen porque se retiran los elementos que son capaces de tomarlo de la atmósfera. Además, todo ese carbono acumulado en el bosque y las plantas puede ser

liberado, y de manera todavía más directa si el bosque y las plantas se queman. Esta liberación de carbono aumentaría la cantidad de bióxido de carbono en la atmósfera.

Otra razón poderosa para el aumento del carbono en la atmósfera son las emisiones por la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) en el transporte, la industria y la generación de electricidad en termoeléctricas.

La presencia de demasiado carbono en la atmósfera aumenta el efecto invernadero del planeta. Como resultado de lo anterior el ciclo del carbono está abierto y, debido a eso, la temperatura de la atmósfera ha ido en aumento desde la Revolución industrial. Para algunos, el aumento sostenido de la temperatura atmosférica puede provocar un cambio climático catastrófico.

Para prevenir lo anterior es necesario, al menos, sustituir los combustibles fósiles por otras energías en las aplicaciones sociales donde hoy en día se requieren. También es necesario reforestar todo lo que se ha derribado de bosques y regresar muchos de los suelos a la función que antes tenían.

ACTIVIDAD

El ciclo del carbono

- Investigue qué se entiende por “vocación” del suelo.
- Enumere algunas acciones locales que, a nivel individual, pueden ayudar a reestablecer el ciclo del carbono.

≈ LECTURA ≈

Cambios físicos y químicos

Los cambios físicos son procesos en donde puede cambiar el aspecto, la forma y el estado de la materia. Por ejemplo, si calentamos agua, ésta hierve y se transforma en vapor, las partículas que componen el agua están ordenadas de diferente forma, pero sigue siendo agua en otro estado.

Si se disuelve sal en agua, se obtiene agua salada. Las sustancias originales se conservan; de hecho, si se calienta el agua salada hasta que hierva y se evapore, se recupera la sal.

Los cambios químicos son procesos en los que cambia la naturaleza de las sustancias para formar otras nuevas. Por ejemplo, si se quema un papel, se obtienen cenizas y humo. Inicialmente se tenía papel y oxígeno en el ambiente, al final se tienen cenizas y dióxido de carbono. Si se deja un metal como el hierro a la intemperie, se oxidará. Inicialmente se tenía hierro y oxígeno en el ambiente, al final se obtiene óxido de hierro, con propiedades diferentes a las que tenía. Una reacción química es un proceso en que, a partir de sustancias iniciales (reactivos), se obtienen sustancias distintas (productos).

En las reacciones químicas se puede presentar un cambio de coloración, aparición de algún sedimento o desprendimiento de gas.

Protección térmica

Se dijo que cuando dos objetos a diferente temperatura se ponen en contacto térmico, el de menor temperatura se energiza por calor, en tanto que el de mayor temperatura se desenergiza también por calor.

Si el objeto de menor temperatura es la mano y el objeto de mayor temperatura es un plato caliente, el proceso de intercambio energético puede ser extremadamente doloroso. La rapidez de energización de la mano por calor puede ser tan intensa, que los tejidos de la piel llegan a quemarse produciendo heridas dolorosas y peligrosas.

La medida para proteger la mano consiste en usar un aislante térmico y así poder sostener el objeto caliente.

También la radiación solar puede producir quemaduras en la piel. En este caso, una medida de protección es no exponerse a la radiación solar directa o utilizar un bloqueador solar.

¿Por qué es posible caminar sobre la arena caliente de una playa sin quemarse, o sobre el pavimento de una calle, mojándose las plantas de los pies?

Conducción, convección y radiación de calor

Si existe una diferencia de temperaturas entre dos o más cuerpos, se dan las condiciones para la interacción térmica por calor. Las formas en que un cuerpo a diferente temperatura puede influir energéticamente por calor sobre otros son tres: conducción, convección y radiación.

Un ejemplo sencillo donde ocurre el proceso de *calor por conducción* es el de la olla sobre una flama. Basta la diferencia de temperatura entre la flama y el agua de la olla para que el metal se encargue de propiciar la interacción térmica por calor.

En este proceso de conducción, la pared diatérmica que conecta el agua con la flama permanece inalterada: no hay transporte de materia. El término “conducción de calor” recuerda la antigua teoría sobre el calor, en que se le consideraba una especie de fluido que pasaba del cuerpo de mayor temperatura al otro. La pared diatérmica es entonces el conducto por donde el calor “fluye” 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 es su valor, mejor propicia la interacción térmica entre los objetos que 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.

Experimentalmente se encuentra que la rapidez de la interacción térmica (potencia) por conducción entre dos objetos, es decir, la potencia de energización por calor, depende del tamaño de la superficie de contacto entre ellos, el espesor de la pared diatérmica, la diferencia de temperatura y la conductividad térmica de esta pared, entre otros factores relevantes.

La potencia tiene unidades de energía entre tiempo, es decir, de joule/segundo en el SIU. A la unidad de potencia se le llama watt (W), de modo que:


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

El *calor por convección* entre dos cuerpos se presenta, por ejemplo, cuando el aire alrededor de un cuerpo caliente aumenta su temperatura, lo que provoca que su densidad disminuya y, por lo tanto, se eleve, intercambiando energía interna por calor con las regiones superiores de menor temperatura. Este proceso puede repetirse cíclicamente, dando lugar a las llamadas *corrientes de convección*.

Como el proceso de transporte energético por la masa de aire ocurre en un tiempo determinado, en realidad se está hablando de la potencia de calor por convección. La potencia del calor por convección depende de la diferencia de temperaturas, de la forma

geométrica de la superficie que conecta ambas regiones, de la rapidez de transporte del fluido (el aire en el caso que se describe), entre otros factores.

ACTIVIDAD

 Una vez que la olla con agua esté caliente, sitúe su mano cerca de ella. ¿Qué siente?
Percibirá que su mano se calienta. Como usted no tocó la superficie de la olla, no se trata de calor por conducción, y como tampoco se trata del aire caliente que escapa hacia arriba, no se trata de calor por convección.

Lo que sucede es que sobre su mano incide radiación electromagnética que proviene de la superficie de la olla. Se habla entonces de *calor por radiación*.


La radiación electromagnética transporta energía en un cierto tiempo y, por eso, se trata de potencia de calor por radiación. El tiempo de transmisión es muy pequeño porque la radiación viaja a la velocidad de la luz.

Todo objeto termodinámico emite radiación electromagnética. Esto significa que si la olla está a la misma temperatura que los objetos que la rodean, la radiación que emite es la misma cantidad que recibe. Entonces, si la olla está a una temperatura superior en forma neta emite más radiación de la que recibe.


La radiación que llega a un objeto puede ser en parte absorbida, emitida o simplemente reflejada.

¿Qué hace para protegerse de la radiación del Sol? ¿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 le llega. 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 negro, otra de blanco y la otra déjela del color original. Llénelas de agua y sométalas por una hora a la radiación solar. Sienta con un dedo las temperaturas. ¿Cuál elevó más su temperatura?

ACTIVIDAD

 Repita el experimento anterior envolviendo cada lata en una bolsa de plástico transparente. ¿Qué sucede con la temperatura, respecto a las mediciones anteriores? ¿Cambian?

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 absorptividad.

¿Qué absorptividad es mayor? ¿La de un cuerpo negro o la de uno blanco?

Energía solar y sustentabilidad

¿Cómo se define el desarrollo sustentable?

Los calentadores solares de agua domésticos utilizan superficies negras para captar de manera eficiente la radiación solar. La radiación capturada por la superficie negra se aprovecha para subir la temperatura del agua. Posteriormente el agua caliente es almacenada en un contenedor de paredes adiabáticas para conservar su temperatura el máximo tiempo posible.

En los calentadores solares se interpone una capa de aire entre la superficie negra de captación y el aire circundante, con el fin de disminuir las pérdidas de energía por calor de convección.

Una medida muy recomendable para ahorrar dinero y gas en casa, así como para disminuir la contaminación atmosférica, consiste en la sustitución del calentador de gas por un calentador solar (fig. 5).



Figura 5 | Calentador solar | © Marco Martínez.

- ¿Cuánto se ahorra de gas en un hogar de siete miembros, en donde un tanque de gas de 30 kg duraba un mes, mientras que al instalar un calentador solar de agua de tubos al alto vacío el mismo tanque dura seis meses?
- ¿Qué porcentaje del gas, en el hogar de la pregunta anterior, se quema para cocinar y qué porcentaje para calentar agua?
- Si un calentador solar para siete personas cuesta doce mil pesos (2012), ¿en cuánto tiempo recupera la inversión esta familia?


En las grandes urbes, como la ciudad de México, la tercera causa de contaminación atmosférica es la quema de gas doméstico, después del transporte y la industria; de aquí la importancia de sustituir las fuentes de energía no renovables por las renovables.

- ¿Qué relación encuentra entre el desarrollo sustentable y la sustitución de fuentes de energía no renovables por fuentes de energía renovables?

En los meses de marzo, abril y mayo el cielo es despejado, de manera que la radiación solar puede sobrecalentar los techos de las casas, haciendo que la temperatura en el interior no sea confortable. Una solución al problema consistiría en emplear un aparato de aire acondicionado; otra, instalar un techo “falso” de lámina reflectora de la radiación solar, a unos 10 cm de altura del piso de la azotea.

Enumere las ventajas y desventajas de ambas soluciones para el desarrollo sustentable, y aun para la economía familiar. Tome en cuenta que, en México, cerca del 70% de la electricidad se genera mediante la quema de combustibles fósiles no renovables como carbón, petróleo y gas.

ACTIVIDAD

 Diseñe un calentador solar casero utilizando materiales disponibles en su entorno (consulte en Internet los diferentes diseños).

Sociedad, energía y ambiente

Las sociedades del planeta necesitan usar energía para su supervivencia pero, si no es la adecuada, pueden poner en peligro su misma supervivencia mediante impactos ambientales globales.

En general las energías que se utilizan en la sociedad se clasifican en dos grandes grupos: *agotables e inagotables*.


Las energías inagotables tienen como fuente al Sol y la geotermia. Ésta, que proviene de la energía interna de la Tierra, almacenada en sus capas interiores a alta temperatura desde los orígenes del planeta, es tan grande en comparación con el uso total de energía, que se la puede considerar como una fuente inagotable.

A su vez la energía solar, también llamada *renovable*, puede ser directa e indirecta. Los concentradores planos y parabólicos, así como las celdas fotovoltaicas son notables ejemplos de la energía solar directa; en ambos casos se puede obtener energía eléctrica como producto secundario.

La energía solar indirecta implica que la energía solar incidente se almacena de manera intermedia por uno o varios procesos, antes de estar disponible para su utilización. Las posibilidades son enormes. Ejemplos de energías solares indirectas son la biomasa, que es energía solar fijada por la fotosíntesis (leña, residuos agrícolas, biocombustibles líquidos); hidro, que es el agua elevada por evaporación (presas, con las que se genera electricidad); viento, ocasionado por diferencias de presión debido a la radiación solar (aerogeneradores, molinos, etc.); mareas; gradientes marinos de temperatura; etcétera.

La mayor parte de las energías renovables son de usos múltiples. La biomasa, por ejemplo, puede ser utilizada como biocombustible en el transporte (en los motores de combustión interna), pero también se puede utilizar en la generación de calor industrial o en termoeléctricas. Otras energías renovables, como las obtenidas de las presas y los aerogeneradores, tienen como utilidad principal la producción de electricidad.

ACTIVIDAD

 Enumere las diferentes energías que utiliza en su hogar y clasifíquelas de acuerdo a si son agotables o inagotables. Analice las posibilidades técnicas y económicas que tiene el sustituir unas por otras.

Las principales energías agotables, también llamadas *no renovables*, provienen de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas.

Los distintos tipos de sociedades utilizan las energías agotables e inagotables, en mayor o menor medida, pudiendo distinguirse la estructura siguiente:

Las energías no renovables se emplean intensivamente en los países altamente industrializados y urbanizados, mientras que su empleo es menos amplio e intensivo en países menos industrializados. Incluso en las zonas rurales de estos últimos la preferencia es por el uso de energías renovables.

En épocas anteriores a la Revolución industrial del siglo XVIII en Europa, que se extendió a Estados Unidos, Japón, Australia y otros países, predominaba el uso de las energías renovables. Pero con ella, apoyada en el uso masivo de los motores térmicos, se pasó a depender de las energías no renovables.

Los problemas que plantea la actual utilización energética son varios, de una naturaleza tal que ponen en entredicho la supervivencia de las sociedades, así como del ambiente en que se desenvuelven. Se pueden percibir al menos tres grandes problemas, que a continuación se exponen.

Los problemas que plantea la actual utilización energética son varios, de una naturaleza tal que ponen en entredicho la supervivencia de las sociedades, así como del ambiente en que se desenvuelven. Se pueden percibir al menos tres grandes problemas, que a continuación se exponen.


Contaminación global

La quema intensiva de los combustibles fósiles se efectúa para la generación de electricidad en termoeléctricas, que son básicamente motores térmicos como los que se han visto anteriormente.

En las termoeléctricas se quema carbón, petróleo y gas en la caldera para hervir agua y el vapor resultante se utiliza para mover una turbina (como en el motor térmico casero). El movimiento rotatorio de la turbina se acopla con un generador de electricidad. Ésta sale a las torres de transmisión y de ahí a los sitios de utilización: industrias, hogares, alumbrado público, transporte colectivo, etcétera.

En la quema de los combustibles fósiles es donde se expulsa hacia la atmósfera los gases contaminantes como el monóxido y el dióxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno y muchos otros más. Estos compuestos químicos posteriormente dan origen, al combinarse con vapor de agua, a ácidos (como el sulfúrico) que por la lluvia contribuyen a la acidificación de los lagos, mares y ríos, e incluso de los suelos boscosos, agrícolas y de toda índole. Ni los edificios se salvan de la acción corrosiva de los ácidos.

ACTIVIDAD

 Identifique en su entorno un problema de contaminación que sea adjudicable al uso de energías agotables. Discuta la posibilidad de su solución en términos del empleo de energías más limpias.


Calentamiento global

La atmósfera de la Tierra es como un gigantesco invernadero, sobre el que incide la radiación solar. El resultado es que parte de la radiación se refleja y parte es transmitida hacia el interior, en donde es absorbida y remitida por la infinidad de objetos que hay sobre su superficie y por ésta misma.


Ahora bien, una pequeña porción de la radiación incidente es definitivamente atrapada en la atmósfera, debido a la presencia de gases en la atmósfera, como el vapor de agua y otros gases, llamados precisamente gases de efecto invernadero. Esto da como resultado un pequeño incremento en la temperatura global del planeta, que a partir de la Revolución industrial, y sobre todo durante los últimos cien años, ha sido de poco menos de 1 °C.

De los gases de efecto invernadero el dióxido de carbono es de los más importantes, porque es el que más se produce y es uno de los captosres más eficaces de la radiación infrarroja. Un cierto porcentaje del dióxido de carbono enviado a la atmósfera es producido por las termoeléctricas, al quemar combustibles fósiles. Otro porcentaje es generado por los vehículos de transporte.

ACTIVIDAD

 Averigüe las proporciones de producción de dióxido de carbono, de acuerdo con sus fuentes. ¿Cuál es la fuente principal de generación de dióxido de carbono? ¿Qué alternativas hay?

ACTIVIDAD

 Coloque, al mismo tiempo, dos cubos de hielo del refrigerador, cada uno en un recipiente de plástico transparente idéntico y expóngalos al Sol. Pero uno de ellos llénelo con humo de cigarrillo, usando un popote. ¿Espera observar una diferencia apreciable en el tiempo de derretimiento de los hielos?

Hoy en día se piensa que un aumento superior a los 2 o 3 °C en la temperatura media del planeta, podría desencadenar un cambio climático con consecuencias catastróficas; por ejemplo el derretimiento de los hielos polares con la consecuente elevación del nivel del mar.

Guerras y armas nucleares

Al parecer, muchas guerras, han sido provocadas por el acceso a recursos considerados estratégicos por algunas naciones. Las guerras recientes en la zona del Medio Oriente lo confirman, en donde Iraq, Irán, Kuwait y Afganistán han sido invadidas por países extranjeros, debido a sus grandes reservas de petróleo.

Las guerras del petróleo se han dado aunque el petróleo no esté por agotarse en la zona, pero estos eventos anticipan situaciones más difíciles para cuando las reservas se estén agotando.

Un factor agravante de riesgo es la presencia de armas nucleares entre las potencias del planeta, las que dependen en su mayoría de los energéticos agotables como el petróleo.

¿En qué acciones, en lo individual, piensa que es importante involucrarse para disminuir el riesgo de una guerra nuclear?

Transición energética

El uso extensivo e intensivo de los tres energéticos agotables —carbón, petróleo y gas— plantea la necesidad de su abandono por energéticos más limpios y de amplia disponibilidad, es decir, los inagotables.

Dado que la sustitución de unas energías por otras generalmente tarda al menos de tres a cuatro décadas, de acuerdo con los registros históricos de transiciones energéticas anteriores, es imprescindible tomar de inmediato medidas para transitar hacia las energías inagotables.

Serán necesarios, sin embargo, ajustes y cambios en las sociedades, que pueden ser profundos y, por ello, de difícil implementación.

Tal es el caso, por citar un ejemplo importante, de la modificación del sistema de transporte, que hoy en día se sostiene por el consumo de energéticos fósiles. Y, como el sistema de transporte es requerido intensamente por el modelo actual de vida urbana, los cambios implicados tendrán necesariamente que afectar otros aspectos de la organización social.

Habrá que privilegiar al transporte colectivo sobre el transporte individual, si se trata de desplazar personas. Tratándose de las mercancías por tierra, es indudable la necesidad de regresar al ferrocarril eléctrico, movido por electricidad obtenible de energías renovables.

¿En qué acciones, en el nivel individual, piensa que es importante involucrarse para propiciar la transición a las energías inagotables?