



*Chelcie Liu pide a los estudiantes que consulten con sus compañeros y predigan qué bola llegará primero al final de las pistas, que tienen la misma longitud.*

**H**ace más de 2,000 años, los antiguos científicos griegos estaban familiarizados con algunas de las ideas de la física que estudiamos en la actualidad. Entendían bien algunas propiedades de la luz, pero se confundían en lo relativo al movimiento. Con Galileo y su estudio de las esferas sobre planos inclinados, se alcanzó un gran progreso respecto a la comprensión del movimiento, como vimos en el capítulo anterior. En este capítulo aprenderemos las reglas del movimiento que abarcan tres conceptos: *rapidez*, *velocidad* y *aceleración*. Sería bueno dominar estos conceptos, pero bastará con que te familiarices con ellos y puedas distinguirlos entre sí. En los siguientes capítulos te habituarás más a ellos. Aquí sólo estudiaremos la forma más sencilla del movimiento: la que va a lo largo de una trayectoria en línea recta, es decir, el *movimiento rectilíneo*.

## El movimiento es relativo

Todo se mueve, hasta lo que parecería estar en reposo. Todo se mueve en relación con el Sol y las estrellas. Mientras estás leyendo este libro, te mueves a unos 107,000 kilómetros por hora en relación con el Sol, y te mueves aún más rápido con respecto al centro de nuestra galaxia. Cuando examinamos el movimiento de algo, lo que describimos es el movimiento en relación con algo más. Si caminas por el pasillo de un autobús en movimiento, es probable que tu rapidez con respecto al piso del vehículo sea bastante distinta de tu rapidez con respecto al camino. Cuando se dice que un auto de carreras alcanza una rapidez de 300 kilómetros por hora, queremos decir que es con respecto a la pista de competencias. A menos que indiquemos otra cuestión, al describir la rapidez de cosas de nuestro entorno, lo haremos en relación con la superficie terrestre. El movimiento es relativo.

## Rapidez



Antes de Galileo, la gente describía los objetos en movimiento simplemente como “lentos” o “rápidos”; no obstante, tales descripciones eran muy vagas. A Galileo se le da el crédito de ser primero en medir la rapidez al considerar la distancia que se cubre durante cierto tiempo. Definió la **rapidez** como la distancia recorrida por unidad de tiempo.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

**FIGURA 3.1**

Cuando estás sentado en una silla, tu rapidez es cero con respecto a la Tierra; pero 30 km/s respecto al Sol.

**TABLA 3.1**

### Rapideces aproximadas en distintas unidades

12 mi/h = 20 km/h = 6 m/s
25 mi/h = 40 km/h = 11 m/s
37 mi/h = 60 km/h = 17 m/s
50 mi/h = 80 km/h = 22 m/s
62 mi/h = 100 km/h = 28 m/s
75 mi/h = 120 km/h = 33 m/s
100 mi/h = 160 km/h = 44 m/s

**FIGURA 3.2**

Este velocímetro da lecturas en millas por hora y en kilómetros por hora.

Un ciclista que recorre 30 metros en un tiempo de 2 segundos, por ejemplo, tiene una rapidez de 15 metros por segundo.

Cualquier combinación de unidades de distancia entre tiempo es válida para medir la rapidez: para los vehículos de motor (o en distancias largas) por lo común se utilizan las unidades de kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h, o mph). Para distancias más cortas con frecuencia se usan las unidades de metros por segundo (m/s). El símbolo diagonal (/) se lee *por*, y quiere decir “dividido entre”. En este libro usaremos principalmente metros por segundo. La tabla 3.1 muestra la comparación de rapideces, en distintas unidades.<sup>1</sup>

## Rapidez instantánea

Las cosas que se mueven a menudo tienen variaciones en la rapidez. Un automóvil, por ejemplo, puede recorrer una calle a 50 km/h, detenerse hasta 0 km/h con la luz roja del semáforo, y acelerar sólo hasta 30 km/h debido al tránsito vehicular. Puedes saber en cada instante la rapidez del automóvil observando el velocímetro. La rapidez en cualquier instante es la *rapidez instantánea*. En general, cuando un automóvil viaja a 50 km/h, sostiene esa rapidez durante menos de una hora. Si lo hiciera durante toda una hora, recorrería los 50 km. Si durara media hora a esa velocidad, recorrería la mitad de esa distancia, es decir, 25 km. Si sólo durara 1 minuto, recorrería menos de 1 km.

## Rapidez media

Cuando se planea hacer un viaje en automóvil, el conductor desea saber el tiempo de recorrido. Lo que considera es la *rapidez promedio* o *rapidez media*, en el viaje. La rapidez media se define como:

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}}$$

La rapidez media se calcula con mucha facilidad. Por ejemplo, si recorremos 80 kilómetros de distancia en un tiempo de 1 hora, decimos que nuestra rapidez media fue de 80 kilómetros por hora. Asimismo, si recorriéramos 320 kilómetros en 4 horas,

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}} = \frac{320 \text{ km}}{4 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$$

Vemos que cuando una distancia en kilómetros (km) se divide entre un tiempo en horas (h), el resultado está en kilómetros por hora (km/h).

Como la rapidez media es la distancia total recorrida dividida entre el tiempo total del recorrido, no indica las diversas rapideces ni sus posibles variaciones durante intervalos de tiempo más cortos. En la mayoría de nuestros viajes avanzamos con varias rapideces, de manera que la rapidez media es muy distinta de la rapidez instantánea.

Si conocemos la rapidez media y el tiempo de recorrido, es fácil determinar la distancia recorrida. Si la definición anterior se ordena de forma sencilla, se obtiene

$$\text{Distancia total recorrida} = \text{rapidez media} \times \text{tiempo}$$

<sup>1</sup>La conversión se basa en 1 h = 3600 s y 1 mi = 1609.344 m.



Si te infraccionan por exceso de velocidad, ¿fue por tu *rapidez instantánea* o por tu *rapidez media*?

¡EUREKA!

Si tu rapidez media es 80 kilómetros por hora durante un viaje de 4 horas, por ejemplo, recorres una distancia total de 320 kilómetros.

### EXAMÍNATE

- ¿Cuál es la rapidez media de un guepardo que recorre 100 metros en 4 segundos? ¿Y si recorre 50 m en 2 s?
- Si un automóvil se mueve con una rapidez media de 60 km/h durante una hora, recorre una distancia de 60 km.
  - ¿Cuánto hubiera recorrido si se moviera con esa rapidez durante 4 h?
  - ¿Y durante 10 h?
- Además del velocímetro en el tablero de instrumentos, en los automóviles se instala un odómetro, que indica la distancia recorrida. Si se ajusta la distancia inicial a cero, al principio de un viaje, y media hora después indica 40 km, ¿cuál fue la rapidez media?
- ¿Sería posible alcanzar esta rapidez media sin exceder la rapidez de 80 km/h?

## Velocidad



Cuando se conocen tanto la rapidez como la dirección de un objeto, estamos especificando su **velocidad**. Cuando decimos que un automóvil viaja a 60 km/h, por ejemplo, nos referimos a su rapidez. Pero si señalamos que se mueve 60 km/h al norte especificamos su *velocidad*. La rapidez es una descripción de qué tan rápido se mueve; mientras que la velocidad indica qué tan rápido se mueve y en qué dirección. A una cantidad como la velocidad, que especifica tanto dirección como magnitud se le denomina **cantidad vectorial**. Recuerda del capítulo 2 que la fuerza es una cantidad vectorial, la cual para describirse requiere tanto magnitud

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

(¿Estás leyendo esto antes de haber razonado las respuestas? Como dijimos en el capítulo anterior, cuando encuentres las preguntas Examínate que hay en este libro, detente y **piensa** antes de leer las respuestas que vienen adelante. No sólo aprenderás más, sino que disfrutarás del mayor aprendizaje.)

- En ambos casos, la respuesta es 25 m/s:

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{100 \text{ metros}}{4 \text{ segundos}} = \frac{50 \text{ metros}}{2 \text{ segundos}} = 25 \text{ m/s}$$

- La distancia recorrida es la rapidez media  $\times$  tiempo del viaje, de manera que
  - Distancia = 60 km/h  $\times$  4 h = 240 km.
  - Distancia = 60 km/h  $\times$  10 h = 600 km.
- Rapidez media =  $\frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{40 \text{ km}}{0.5 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$ .
- No, si el viaje parte del reposo y termina en el reposo. Hay veces que las rapidez instantáneas son menores que 80 km/h, por lo que el conductor debe manejar, por momentos, con rapidez mayor que 80 km/h para obtener un promedio de 80 km/h. En la práctica las rapidez medias suelen ser mucho menores que las máximas rapidez instantáneas.

como dirección. Asimismo, la velocidad es una cantidad vectorial. En cambio, las cantidades que se describen sólo con magnitud se denominan *cantidades escalares*. La rapidez es una cantidad escalar.

## Velocidad constante

La rapidez constante no varía. Algo con rapidez constante ni disminuye ni aumenta su rapidez. Por otro lado, la velocidad constante implica *tanto* rapidez constante *como* dirección constante. Esta última es una recta: la trayectoria del objeto no describe una curva. Por consiguiente, velocidad constante significa movimiento en una recta a rapidez constante.

## Velocidad variable

Si la rapidez o la dirección cambian (o si ambas lo hacen), entonces cambia la velocidad. Por ejemplo, un automóvil que describe un círculo tiene rapidez constante, pero como su dirección cambia, su velocidad no es constante. Estudiaremos esto en la siguiente sección cuando veamos la *aceleración*.



FIGURA 3.3

El automóvil en la trayectoria circular puede tener una rapidez constante, pero su velocidad cambia a cada instante. ¿Por qué?

### EXAMÍNATE

1. "Una persona se mueve con una rapidez constante en una dirección constante." Di lo mismo con menos palabras.
2. El velocímetro de un automóvil que va hacia el este indica 100 km/h. Se cruza con otro que va hacia el oeste a 100 km/h. ¿Los dos vehículos tienen la misma rapidez? ¿Tienen la misma velocidad?
3. Durante cierto intervalo de tiempo, el velocímetro de un automóvil marca 60 km/h constantes. ¿Esto equivale a una rapidez constante? ¿Y a una velocidad constante?

## Aceleración



Definición de aceleración  
Ejemplo numérico  
de aceleración

Podemos cambiar la velocidad de algo al modificar su rapidez, su dirección o *ambas*. El qué tan rápido cambia la velocidad es lo que entendemos por **aceleración**:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento. Estamos familiarizados con la aceleración de un automóvil.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. "Una persona se mueve con velocidad constante."
2. Ambos vehículos tienen la misma rapidez; pero sus velocidades son contrarias porque se mueven en direcciones contrarias.
3. La lectura constante del velocímetro indica que la rapidez es constante, aunque la velocidad quizá no sea constante ya que el vehículo podría no estarse moviendo en una trayectoria rectilínea, en cuyo caso estaría acelerando.

**FIGURA 3.4**

Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento.

Cuando el conductor pisa el acelerador, los pasajeros experimentamos aceleración conforme nos recargamos más contra los asientos. La idea clave que define la aceleración es el *cambio*. Supongamos que al manejar aumentamos, en un segundo, nuestra velocidad de 30 a 35 kilómetros por hora, y en el siguiente segundo a 40 kilómetros por hora, y a 45 en el siguiente y así sucesivamente. Cambiamos la velocidad en 5 kilómetros por hora cada segundo. Este cambio de velocidad es lo que entendemos por aceleración.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5 \text{ km/h}}{1 \text{ s}} = 5 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

En este caso, la aceleración es 5 kilómetros por hora por segundo (y se escribe 5 km/h·s). Observa que entran dos veces unidades de tiempo: una por la unidad de velocidad, y de nuevo por el intervalo de tiempo en que cambió la velocidad. Nota también que la aceleración no es tan sólo el cambio total de la velocidad: es la *razón de cambio* de la velocidad con respecto al tiempo, o el *cambio de velocidad por segundo*.

### EXAMÍNAME

1. Un automóvil puede pasar del reposo a 90 km/h en 10 s. ¿Cuál es su aceleración?
2. En 2.5 s, un automóvil aumenta su rapidez de 60 a 65 km/h, mientras que una bicicleta pasa del reposo a 5 km/h. ¿Cuál de los dos tiene la mayor aceleración? ¿Cuál es la aceleración de cada uno?

El término *aceleración* se aplica tanto a disminuciones como a incrementos de la velocidad. Por ejemplo, decimos que los frenos de un automóvil producen grandes desaceleraciones, es decir, que hay una gran disminución de la velocidad del vehículo en un segundo. Con frecuencia se llama a esto *desaceleración*. Sentimos la desaceleración cuando el conductor de un autobús aplica los frenos y nos sentimos impulsados hacia adelante del vehículo.

Aceleramos siempre que nos movemos en trayectorias curvas, aun cuando nos movamos a rapidez constante, ya que nuestra dirección cambia y, por consiguiente, también cambia nuestra velocidad. Sentimos esta aceleración cuando algo nos impulsa hacia el exterior de la curva.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Su aceleración es 9 km/h·s. Específicamente hablando, sería su aceleración media, porque habría cierta variación en esta tasa de aumento de rapidez.
2. Las aceleraciones del automóvil y de la bicicleta son iguales: 2 km/h·s.

$$\text{Aceleración}_{\text{coche}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{65 \text{ km/h} - 60 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = \frac{5 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = 2 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

$$\text{Aceleración}_{\text{bici}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5 \text{ km/h} - 0 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = \frac{5 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = 2 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

Aunque tales velocidades son muy distintas, la razón de cambio de la velocidad es la misma. Por lo tanto, las aceleraciones son iguales.

**FIGURA 3.5**

El conductor siente una rápida desaceleración, al ser impulsado hacia adelante (de acuerdo con la primera ley de Newton).



Hay tres dispositivos que cambian la velocidad en un automóvil: el acelerador, los frenos y el volante.

¡EUREKA!

Por este motivo distinguimos entre rapidez y velocidad, y definimos la *aceleración* como la razón con la que cambia la velocidad en el tiempo, y con ello abarcamos los cambios tanto en la rapidez como en la dirección.

Quien ha estado de pie en un autobús lleno de pasajeros ha sentido la diferencia entre la velocidad y la aceleración. A excepción de los saltos en un camino irregular, tú puedes estar de pie, sin esfuerzos adicionales, dentro de un autobús que se mueva a velocidad constante, independientemente de lo rápido que vaya. Puedes lanzar una moneda hacia arriba y atraparla exactamente del mismo modo que si el vehículo estuviera parado. Sólo cuando el autobús acelera, sea que aumente o disminuya su rapidez, o que tome una curva, es cuando tienes algunas dificultades.

En gran parte de este libro sólo nos ocuparemos de los movimientos a lo largo de una línea recta. Cuando se describe el movimiento rectilíneo, se acostumbra usar los términos *rapidez* y *velocidad* en forma indistinta. Cuando no cambia la dirección, la aceleración se puede expresar como la razón de cambio de la *rapidez* en el tiempo.

$$\text{Aceleración (en una recta)} = \frac{\text{cambio en la rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

### EXAMÍNATE

1. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil de carreras que pasa zumbando junto a ti con velocidad constante de 400 km/h?
2. ¿Qué tiene mayor aceleración, un avión que pasa de 1,000 a 1,005 km/h en 10 segundos, o una patineta que pasa de 0 a 5 km/h en 1 segundo?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cero, porque su velocidad no cambia.
2. Los dos aumentan su rapidez en 5 km/h, pero la patineta lo hace en la décima parte del tiempo. Por consiguiente, la patineta tiene la mayor aceleración, 10 veces mayor. Con algunos cálculos se demuestra que la aceleración del avión es 0.5 km/h·s; mientras que la de la patineta, que es más lenta, es 5 km/h·s. La velocidad y la aceleración son conceptos muy diferentes. Es muy importante diferenciarlos.

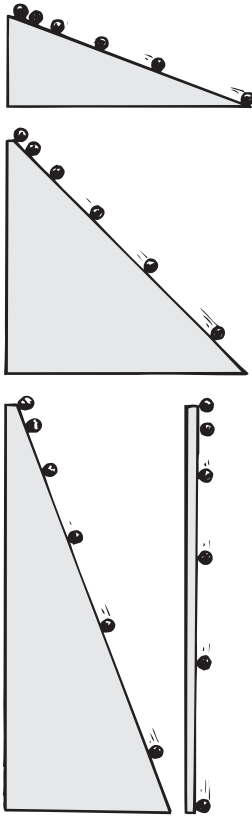


FIGURA 3.6

Figura interactiva

Cuanto mayor sea la inclinación del plano, la aceleración de la esfera será mayor. ¿Cuál es la aceleración en el plano vertical?

## La aceleración en los planos inclinados de Galileo

Galileo desarrolló el concepto de aceleración con sus experimentos en planos inclinados. Su principal interés era el de la caída de los objetos, y como carecía de los cronómetros adecuados, usó planos inclinados para disminuir el movimiento acelerado e investigarlo más cuidadosamente.

Encontró que una esfera que rueda bajando por un plano inclinado aumenta en la misma cantidad su rapidez en los segundos sucesivos, es decir, rueda sin cambiar su aceleración. Por ejemplo, veríamos que una esfera que rueda por un plano con cierto ángulo de inclinación aumenta su rapidez en 2 metros por segundo cada segundo que rueda. Este incremento por segundo es su aceleración. Su rapidez instantánea a intervalos de 1 segundo, con esta aceleración, será entonces 0, 2, 4, 6, 8, 10, etcétera, metros por segundo. Observamos que la rapidez o velocidad instantánea de la esfera, en cualquier tiempo después de haber sido soltada desde el reposo, es simplemente su aceleración multiplicada por ese tiempo:<sup>2</sup>

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

Si sustituimos la aceleración de la esfera en esta ecuación (dos metros por segundo al cuadrado), podemos ver que al final de 1 segundo viaja a 2 metros por segundo; al final de 2 segundos viaja a 4 metros por segundo; al final de 10 segundos se mueve a 20 metros por segundo; y así sucesivamente. La rapidez o velocidad instantánea en cualquier momento no es más que la aceleración multiplicada por la cantidad de segundos que ha estado acelerando.

Galileo encontró que mayores inclinaciones generan mayores aceleraciones. Cuando el plano es vertical, la esfera alcanza su aceleración máxima. Entonces la aceleración es igual a la de un objeto que cae (figura 3.6). Independientemente del peso o del tamaño del objeto, Galileo descubrió que cuando la resistencia del aire es lo suficientemente pequeña como para no ser tomada en cuenta, todos los objetos caen con la misma aceleración, la que es invariable.

## Caída libre



¿Qué tan rápido?  
Caída libre: ¿Qué tan rápido?

### Qué tan rápido

Los objetos caen a causa de la fuerza de gravedad. Cuando un objeto que cae está libre de toda restricción —sin fricción de aire ni de cualquier otro tipo—, y cae bajo la sola influencia de la gravedad, ese objeto se encuentra en **caída libre**. (En el capítulo 4 describiremos los efectos de la resistencia del aire sobre la caída de objetos.) La tabla 3.2 muestra la rapidez instantánea de un objeto en caída libre a intervalos de 1 segundo. Lo importante que se nota en esos números es la forma en que cambia la rapidez. *Durante cada segundo de caída el objeto aumenta su velocidad en 10 metros por segundo*. Esta ganancia por segundo es la aceleración.

<sup>2</sup> Observe que esta relación se deriva de la definición de la aceleración. Se parte de  $a = v/t$  (y si se multiplican por  $t$  ambos lados de la ecuación) el resultado es  $v = at$ .