

—¿Quería decirme, por favor, qué camino debo tomar para salir de aquí?  
—Eso depende mucho del lugar adonde quieras ir —dijo el Gato.  
—Me da lo mismo el lugar... —dijo Alicia.  
—Entonces no importa qué camino tomes —dijo el Gato.  
—...mientras llegue a algún lado —agregó Alicia a modo de explicación.  
—¡Oh!, puedes estar segura de llegar a algún lado —dijo el Gato—, si solo caminas lo suficiente.

Alicia sintió que esto era irrefutable, de modo que probó con otra pregunta.

*Alicia en el País de las Maravillas, Lewis Carroll*

#### CONTENIDOS

- Relatividad del movimiento
- Magnitudes físicas
- Sistema Internacional de Unidades
- Cuerpo puntual
- Desplazamiento y distancia
- Velocidad y rapidez
- Relación entre los conceptos de velocidad y aceleración
- Movimientos rectilíneos y circulares
- Las ecuaciones horarias
- Caída libre y tiro vertical
- Tiro oblicuo

# 2

## LA DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO

Si bien el **movimiento** es uno de los fenómenos naturales más comunes y cotidianos que es posible experimentar, su comprensión y formalización ha llevado muchos siglos.

El movimiento fue el primer aspecto de la naturaleza física del mundo que se estudió en profundidad y con detenimiento. Este estudio se remonta a las antiguas civilizaciones del Asia Menor. El interés primario estuvo centrado en el movimiento de los astros, especialmente del Sol y la Luna, con fines prácticos relacionados con el cultivo y la navegación. Sin embargo, el concepto de movimiento que se tiene actualmente se estableció hace unos pocos siglos. En su formulación moderna participaron fundamentalmente Galileo Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1643-1727).

Con el afianzamiento de la física como ciencia independiente de la filosofía, la matemática comenzó a ocupar un lugar cada vez más preponderante en la descripción y análisis de la naturaleza. Como muchos fenómenos físicos se cumplen con regularidad, la matemática se transformó en una herramienta de gran valor para calcular y predecir todo tipo de movimientos, cada vez con mayor precisión. Fenómenos tan diversos como el paso del cometa Halley o la dirección y velocidad de los rayos de luz al atravesar lentes pueden ser explicados de un modo mecánico. La física formalizó matemáticamente cada concepto que construyó, según la idea que el mismo Galileo había propulsado, y que expresó de la siguiente manera:

*La Filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir el Universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático y sus caracteres son triángulos, círculos u otras figuras geométricas, sin los cuales es imposible entender una sola palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto (Il saggiatore, 1623).*



Desde la antigüedad, los científicos estaban interesados en el movimiento de los astros.

El filósofo, matemático y físico francés René Descartes (1596-1650), contemporáneo de Galileo, fue quien profundizó esta línea de pensamiento, al sostener que el universo funcionaba igual que una máquina; y que incluso los fenómenos relacionados con la vida se podían explicar a partir de leyes mecánicas.

Con el tiempo, esta concepción mecánica del universo se estableció firmemente, y llegó a influir en campos tan diversos como la política y la economía. Recién a fines del siglo XIX esta manera puramente mecánica de entender el mundo entraría en crisis.

Para Galileo y Descartes, el universo presentaba una estructura matemática. Incluso consideraban estructurada de la misma manera la mente humana, de tal forma que cuando actuaba matemáticamente sobre la realidad, alcanzaba necesariamente su comprensión verdadera. En la actualidad, la ciencia tiene una concepción diferente de la naturaleza del universo y de la mente. La humanidad construye una explicación provisoria del mundo natural mediante la utilización de conceptos matemáticos, aunque la naturaleza en sí misma no es matemática. Esto no opaca en ningún aspecto los logros derivados de las ideas de aquellos primeros físicos de la Modernidad, que se atrevieron a pensar de un modo original.

El estudio del movimiento está enmarcado dentro de un área de la física denominada **mecánica**. En muchos casos es importante conocer el movimiento de un cuerpo aunque no sea necesario establecer qué lo originó. Se recurre, entonces, a la cinemática. La **cinemática** es la rama de la mecánica que estudia el movimiento de los cuerpos sin tomar en cuenta las causas que lo producen. Permite describir el movimiento de caída de los cuerpos sin considerar qué agente causa dicha caída. De la misma manera, al describir cinemáticamente el movimiento de un planeta o una nave espacial, se puede predecir en qué posición se encuentran y qué velocidad tiene en cada instante, sin tener en cuenta las fuerzas que originan dicho tipo de movimiento ni las características del cuerpo que se mueve.



René Descartes (1596–1650).

## Magnitudes escalares y vectoriales

Geoméricamente, un **vector** es un segmento orientado.

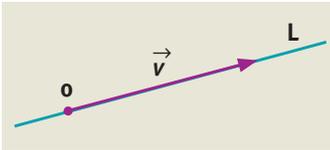
Se designa con una letra y una flecha arriba. Todo vector posee

**origen:** es el punto de aplicación "o";

**dirección:** es la recta L a la que pertenece el vector;

**sentido:** indica hacia dónde apunta el extremo del vector;

**módulo:** también se denomina intensidad o valor. Indica la medida del segmento y se escribe  $|\vec{v}|$  o simplemente  $v$ .



La medida de un vector puede representarse en diferentes escalas. Así, un vector que represente una velocidad de 10 km/h puede tener una longitud de 10 cm o de 1 cm, entre otras muchas posibilidades.

En el mundo de la Física suele decirse que aquello que no se ha logrado medir todavía no se conoce. Por ejemplo, cuando alguien dice que hace frío, su afirmación surge de su percepción pero no necesariamente tiene el mismo significado para todos, puesto que, en una determinada situación, algunas personas pueden estar sintiendo frío y otras no. Sin embargo, cuando se dice que la temperatura ambiente es de 14 °C, todos entienden lo mismo independientemente de la sensación que les produzca esa temperatura. Esto también puede decirse de la velocidad, la longitud, el peso o de cualquier otra magnitud.

Una **magnitud** es una variable física usada para describir la situación de un sistema particular. Indica que la variable es cuantificable, es decir, que se le puede atribuir un valor numérico. En otras palabras, una magnitud es todo aquello que puede medirse. Además de su valor, la magnitud presenta una unidad de medida específica; por ejemplo, la temperatura se puede medir en grados Celsius, la longitud, en metros y el peso, en kilogramos fuerza.

Las magnitudes, por su parte, pueden clasificarse en escalares y vectoriales. Una **magnitud escalar** es aquella que queda totalmente definida si se indica su valor numérico (escalar) y la unidad. Por ejemplo el volumen, el peso específico y el tiempo son magnitudes escalares. Una **magnitud vectorial**, en cambio, es aquella que se define mediante un vector. En este caso, además de especificar el valor numérico y la unidad, es necesario indicar el punto de aplicación, la dirección y el sentido en que actúa. No es lo mismo ejercer una fuerza de 30 kilogramos-fuerza hacia la derecha que hacia la izquierda. Se dice entonces que la fuerza es una magnitud vectorial. Otras magnitudes vectoriales son la velocidad y la aceleración.

### Orden de magnitud

Es frecuente que al trabajar con magnitudes físicas no sea necesario determinar con precisión su valor. En muchos casos, para hacerse una idea, alcanza con considerar el valor de la potencia de 10 que se encuentre más próximo al número buscado. Se denomina **orden de magnitud** a la potencia de 10 más próxima al valor numérico buscado.

Por ejemplo, el orden de magnitud de 88 es  $10^2$  ya que el número 100 es la potencia de 10 más próxima a 88. El orden de magnitud de 104 también es  $10^2$ . En cambio, en el caso de 903, el orden de magnitud es  $10^3$ , mientras que el de 0,004 es  $10^{-3}$ . El 903 es, entonces, aproximadamente un millón de veces ( $10^6$ ) mayor que el 0,004.

Esta forma de indicar valores numéricos es muy útil para comparar datos o fenómenos.

El orden de magnitud de la masa del Sol es de  $10^{30}$  kg y el de la Luna es de  $10^{22}$  kg, es decir  $10^8$  veces menor que aquél.

Algunos ordenes de magnitud son:

Orden de magnitud en metros	
1 año luz	$10^{16}$
Radio del Sistema Solar	$10^{13}$
Radio terrestre	$10^7$
1 kilómetro	$10^3$
1 metro	$10^0$
Un átomo	$10^{-10}$
Un protón	$10^{-15}$



1. Estimen el orden de magnitud de la cantidad de:

- habitantes de la manzana en la que viven;
- hojas en un árbol frondoso;
- gotas que contiene un vaso lleno de agua;
- las estrellas visibles en el cielo nocturno;
- pasos humanos necesarios para llegar de Rosario a Buenos Aires;
- potencia eléctrica consumida en un día en la Argentina.

## Sistema Internacional de Unidades

No se utiliza el mismo sistema de unidades en todos los países. Hay lugares donde la velocidad se especifica en millas por hora y la temperatura en grados Fahrenheit. Incluso dentro de la Argentina es común especificar en pies la altura de un avión o la profundidad de buceo. Por esta razón, con el objetivo de establecer un sistema unificado y de aceptación mundial, la XI Conferencia General de Pesas y Medidas celebrada en París en 1960 estableció el denominado **Sistema Internacional (SI)**. En la República Argentina rige este sistema desde el año 1972 bajo el nombre de Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA).

Este sistema consta actualmente de 7 unidades básicas o fundamentales, siendo el **mol** la última en adoptarse en 1971. Las unidades de base fueron elegidas de manera tal que puedan reproducirse en cualquier parte del mundo en forma definida y lo más exacta posible. Existen en Sevres (París, Francia) patrones del metro y el kilogramo, que fueron utilizados por mucho tiempo y son conservados bajo condiciones ambientales especiales. Hoy se pueden obtener estas unidades patrón utilizando técnicas y aparatos más modernos como los láseres o los relojes atómicos.

Las **magnitudes y unidades fundamentales** del Sistema Internacional son:

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampère	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Se llama **magnitudes derivadas** a las que nacen a partir de las leyes físicas que vinculan las diferentes magnitudes de base por medio de ecuaciones matemáticas. Esto obliga a la aparición de las unidades derivadas. Por ejemplo, velocidad es el cociente entre el desplazamiento efectuado por un móvil y el tiempo empleado, lo cual da como unidad derivada el m/s.

Las unidades que llevan por nombre el de un científico se escriben con minúscula, aunque el símbolo correspondiente se escriba con mayúscula. Por ejemplo, sesenta watt se expresa como 60 W. Algunas de las magnitudes y unidades derivadas en el Sistema Internacional son:

Magnitud	Nombre	Símbolo
Velocidad	metro por segundo	m/s
Aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s <sup>2</sup>
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m <sup>3</sup>
Fuerza	newton	N
Carga eléctrica	coulomb	C
Energía	joule	J
Potencia	watt	W

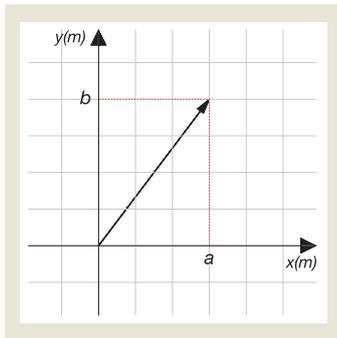
Los primeros sistemas de pesos y medidas aparecieron en Egipto y Babilonia. Se necesitaban para pesar cosechas, medir parcelas de cultivo y para estandarizar las transacciones comerciales. Hacia 3500 a.C., los egipcios utilizaban balanzas, tenían pesos estándar, hechos en piedra o metal, y una unidad de longitud llamada codo, equivalente a unos 52 cm.



La antigua balanza egipcia se usaba en la ceremonia llamada "Pesar el corazón" que se celebraba luego de la muerte de una persona.

Las unidades presentes en las tablas se irán definiendo a lo largo de los próximos capítulos, a medida que se desarrollen las magnitudes a las que dichas unidades hacen referencia.

## Sistema de referencia espacial



Sistema de coordenadas bidimensional.

La ciudad de Mendoza se encuentra a unos 165 km de la ciudad de San Juan y a unos 680 km de la ciudad de Córdoba. La cima del cerro Aconcagua está a unos 6960 metros sobre el nivel del mar, mientras que el volcán Lullillaco, en Salta, tiene una altura de casi 6740 metros. La isla Gran Malvina se ubica a unos  $51^{\circ} 43'$  de latitud Sur y unos  $60^{\circ} 03'$  de longitud Oeste. Como se observa en estos ejemplos, para indicar la posición de un cuerpo es imprescindible tomar otro cuerpo o punto como referencia. Puede ser el centro de una ciudad, el Meridiano de Greenwich, el nivel del mar, o cualquier otro.

Una forma muy útil y simple de expresar la posición de un cuerpo es mediante un sistema de coordenadas cartesianas, que presenta las siguientes características:

- los ejes de referencia son perpendiculares entre sí;
- puede ser **bidimensional** (2D) con coordenadas genéricas  $(x; y)$  en el plano, o **tridimensional** (3D) con coordenadas genéricas  $(x; y; z)$  en el espacio;
- al punto de intersección de los ejes cartesianos se lo llama **origen de coordenadas** y se lo indica como  $(0; 0)$  en el caso bidimensional, y  $(0; 0; 0)$  en el caso tridimensional.

Para cada eje de referencia se considera un semieje positivo en un sentido desde el origen de coordenadas. Los valores en el semieje contrario son negativos.

### Vector posición

La posición es una magnitud vectorial. Cuando se elige un sistema de referencia con coordenadas cartesianas, la posición de un punto en el espacio tridimensional (volumétrico) queda descrita por el **vector posición** que comienza en el origen de coordenadas y termina en el punto mencionado. Las coordenadas del vector posición son entonces las coordenadas del punto, es decir,  $\vec{r} = (x; y; z)$ .

La distancia del punto al origen de coordenadas es el módulo de este vector, que en este caso es:

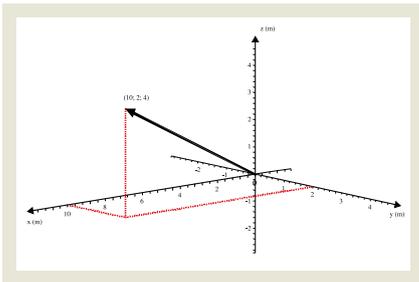
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Por ejemplo, para indicar la posición del centro geométrico de una pelota de fútbol que se encuentra a 10 m de la línea de fondo, a 2 m de la línea de lateral y a 4 m de altura, se utiliza el vector tridimensional  $(10; 2; 4)$  m, considerando el origen de coordenadas sobre el césped justo donde se encuentra el banderín del corner más próximo a la pelota. La distancia de dicho origen a la posición del balón es  $\sqrt{120}$  m  $\approx 10,95$  m.

Si en cambio, el origen se ubicara en el centro del campo, las coordenadas que indican la posición de la pelota serían diferentes, incluso algunas podrían tomar valores negativos. El vector posición y, por lo tanto, las coordenadas que dan la ubicación de un cuerpo, dependen del sistema de referencia elegido.

En el caso de una pelota apoyada sobre el césped, dado que la altura,  $z$ , es cero, su posición se puede indicar mediante un vector en el plano, es decir, en el espacio bidimensional con coordenadas: en cuyo caso, la distancia,  $r$ , desde el origen de coordenadas a dicho punto se calcula mediante:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$



En el sistema de coordenadas tridimensional, las coordenadas del punto coinciden con las del extremo del vector posición.



**2.a.** Realicen un gráfico de coordenadas cartesianas que represente la posición de la mesa del lugar donde se sientan habitualmente tomando como origen de referencia la esquina en la que se encuentra el escritorio del docente.

**b.** Indiquen en el gráfico las coordenadas del vector posición del centro geométrico de esa mesa.

**c.** Calculen la distancia del punto marcado al origen de coordenadas.

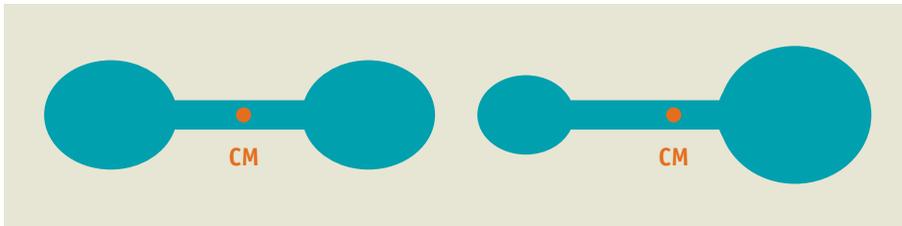
**d.** Midan dicha distancia con una cinta métrica y comparen el valor con el calculado en el ítem anterior.

## El cuerpo puntual

Los cuerpos reales son extensos, es decir, tienen dimensiones y volumen apreciables. Por ello, para indicar la posición de un cuerpo o seguir su movimiento, es conveniente tomar un punto que lo represente. Para eso, es práctico elegir su **centro de masa (CM)**, que es el punto alrededor del cual se distribuye toda la masa de dicho cuerpo. El centro de masa no necesariamente coincide con el centro geométrico del cuerpo y, además, puede estar tanto dentro como fuera de éste.

Si se toma un cuerpo simétrico y homogéneo, el centro de masa coincide con su centro geométrico. Por ejemplo, un par de pesas iguales unidas por una barra constituyen un cuerpo cuyo centro de masa está en el centro de esa barra, en cambio si una de las pesas fuera de mayor masa ese punto se desplazaría hacia ella.

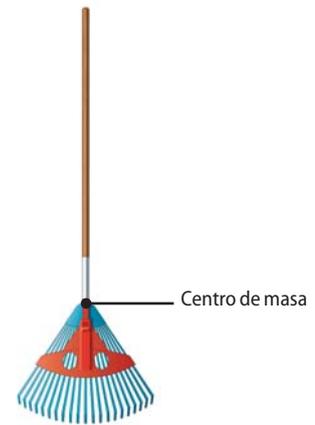
De la misma manera, por ejemplo, un barredor de hojas presenta su centro de masa en el extremo más próximo al rastrillo.



En muchas ocasiones, para ubicar la posición de un cuerpo, o describir su movimiento, basta con conocer el vector posición de su centro de masa.

Se denomina **cuerpo puntual** a aquél que es representado por su centro de masa, y en el que sus dimensiones son despreciables comparadas con el resto de las longitudes que intervienen en el fenómeno por describir. Es un cuerpo idealizado, inexistente en la naturaleza, pero muy práctico para resolver problemas, así como para realizar y simplificar los cálculos. Por ejemplo, para estudiar el movimiento de traslación de la Tierra en comparación con la longitud de su órbita, se la puede considerar como un **cuerpo puntual**, lo mismo que un clavadista que salta desde lo alto de un trampolín hacia la piscina, considerando el punto aproximadamente en el medio de la cintura, siempre que solo se quiera describir su movimiento de caída. En este caso, su centro de masa realiza un movimiento parabólico.

Cuando es necesario realizar un estudio más exhaustivo, también es posible completar el análisis en la situación real del clavadista en rotación durante el salto, o de la Tierra con su rotación diaria. En estos casos existen procedimientos más complejos que permiten describir de modo completo el movimiento puntual de traslación del centro de masa, y el de rotación alrededor de éste.



▶▶ En una primera aproximación, la **masa** se puede considerar como una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo. Un cuerpo con el doble de cantidad de materia que otro, tiene el doble de masa. En el próximo capítulo se analizará que la masa está íntimamente relacionada con el movimiento.

En un salto en alto, el atleta arquea su espalda sobre la barra. Su centro de masa pasa por debajo de la barra, mientras su cuerpo pasa por encima. El cuerpo del atleta alcanza una altura mayor que la de su propio CM.



## El movimiento de los cuerpos

### El movimiento es relativo

Con la letra griega  $\Delta$  (delta mayúscula) se representa una variación o diferencia entre el estado final y el estado inicial de una propiedad del cuerpo. Al encontrarse acompañada de la variable de posición  $x$ , expresa la variación de la posición. Por ejemplo, una persona que se encuentra inicialmente a 4 m de una esquina, y luego de caminar en línea recta se halla a 7 m de ella, presenta un desplazamiento cuyo valor es de:

$$\Delta x = x - x_0 = 7 \text{ m} - 4 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

Un pasajero que viaja en un colectivo puede considerarse en reposo con respecto al asiento del vehículo y, al mismo tiempo, en movimiento con respecto a la calle o a un árbol. Por otro lado, un peatón que está en la parada del colectivo puede considerarse en reposo con respecto a la Tierra, pero en movimiento con respecto al Sol, que se podría suponer en reposo. Asimismo el Sol puede considerarse en movimiento con respecto a nuestra galaxia, y ésta con respecto al resto de las galaxias. Es decir, todo movimiento es relativo al punto de referencia que se considere. Entonces, para describir el movimiento de un cuerpo es necesario previamente elegir alguna referencia. Se dice que un cuerpo se mueve con respecto a otro que se considera fijo, si cambia de posición al transcurrir el tiempo.

Habitualmente se propone un sistema de coordenadas tomando como origen el cuerpo que se supone fijo para determinar el posible cambio de posición de los otros.

La relatividad del movimiento puede incluso ocasionar alguna ilusión momentánea. Suele suceder que al estar sentado en un tren detenido en una estación frente a otro que va en sentido contrario, el pasajero no distingue cuál de ellos es el que se desplaza, si el tren en el que viaja, o el otro, o ambos a la vez. Solo después de observar algún cartel, poste de luz o referencia externa considerada fija se logra establecer qué tren se mueve con respecto a la Tierra.

### Desplazamiento, distancia y trayectoria

Para describir el movimiento de un cuerpo se suele recurrir indistintamente a los conceptos de desplazamiento y distancia, aunque no tienen el mismo significado físico. El **desplazamiento** es una magnitud vectorial que se define como el cambio de posición de un cuerpo. Por ejemplo, en un movimiento unidimensional el módulo del vector desplazamiento sobre el eje  $x$  se calcula mediante la expresión matemática:

$$\Delta x = x - x_0$$

donde  $x_0$  es la abscisa de la posición inicial del cuerpo y  $x$  es la abscisa de su posición final.

El **vector desplazamiento** tiene, entonces, origen en la posición inicial y extremo en la final. La unidad de desplazamiento en el SI es el metro (m). De la misma forma se puede definir el desplazamiento con respecto al eje  $y$  o al eje  $z$ .

El concepto de **distancia**, en cambio, expresa la longitud del camino recorrido por el cuerpo. La distancia recorrida puede o no coincidir con el desplazamiento. Por ejemplo, en una carrera de natación ida y vuelta en una pileta semiolímpica de 25 m de longitud, el desplazamiento total es cero, dado que la posición final e inicial del nadador coinciden. Sin embargo, la distancia recorrida es de 50 m. Lo mismo puede decirse para movimientos no unidimensionales. Por ejemplo, una bicicleta luego de efectuar una vuelta completa a la pista recorre una distancia equivalente al perímetro de esa pista, pero su desplazamiento es cero.

Se denomina **trayectoria** a la curva formada por todas las posiciones tomadas sucesivamente por el móvil. Dos móviles pueden partir y llegar a un mismo lugar, es decir, presentar el mismo desplazamiento y describir trayectorias muy diferentes. El movimiento de un cuerpo puntual puede describir diversos tipos de trayectorias, entre las cuales se destacan: las **rectilíneas**, las **parabólicas** y las **circulares**.



**3.** Un atleta corre en una pista de 400 m de longitud. Si realiza dos vueltas completas, ¿cuál es el valor de su desplazamiento? ¿Y la distancia recorrida?

**4.** Un cuerpo se desplaza desde el punto (5; 7) m al (7; 5) m en línea recta.

**a.** ¿Cuál es el valor del desplazamiento en la coordenada  $x$ ?

**b.** ¿Cuál es el valor del desplazamiento en la coordenada  $y$ ?

**c.** ¿Y en  $z$ ?

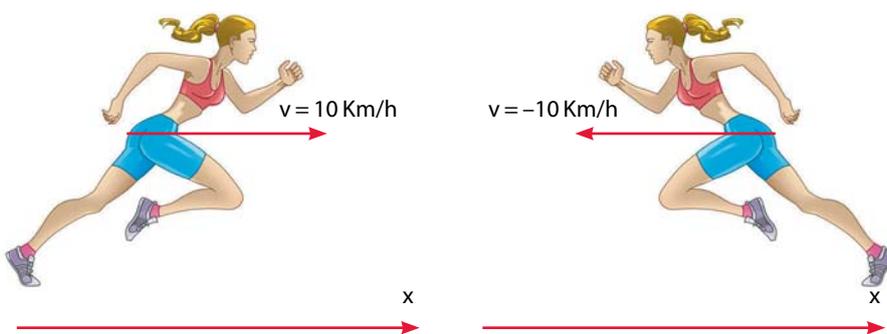
**d.** ¿Cuál es el valor de su desplazamiento? ¿Variaría dicho valor si su trayectoria no fuera rectilínea?

**5.** Calculen el valor del desplazamiento de un ave entre los puntos (2; 4; 7) m y (3; 5; 2) m. Representen el vector desplazamiento en un sistema de coordenadas cartesianas.

## Velocidad y rapidez

En el lenguaje cotidiano, es habitual usar el término velocidad como sinónimo de rapidez; pero en el lenguaje de la Física, se diferencian ambos significados.

La **rapidez** mide la prisa con la que se desplaza un móvil, sin aclarar en qué dirección lo hace. Es una magnitud escalar que especifica el valor de la velocidad en un instante determinado. Por ejemplo, un automóvil que se desplaza de tal manera que su velocímetro indica 65 km/h, tiene una rapidez de 65 km/h. La **velocidad**, en cambio, es una magnitud vectorial, y expresa tanto la rapidez de un cuerpo, como el sentido de su movimiento. En un movimiento unidimensional, dos atletas, uno corriendo a 10 km/h en dirección este-oeste, y otro corriendo a 10 km/h en dirección oeste-este, poseen la misma rapidez, pero sus velocidades son diferentes porque sus sentidos lo son. Para distinguirlos, se asigna signo positivo a la velocidad del atleta que se desplaza según el eje de coordenadas positivo, y signo negativo al que lo hace en sentido contrario.



Tanto la unidad de rapidez como la de velocidad se expresan como la unidad de longitud dividida por una unidad de tiempo: km/h; millas náuticas/h; pies/min; cm/s, etc. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el metro por segundo: m/s.

La velocidad de un móvil puede cambiar aunque su rapidez se mantenga constante. Por ejemplo, si un automóvil toma una curva con una rapidez constante de 100 km/h, este valor no cambia, aunque sí varía su velocidad en cada punto de la curva porque cambia la dirección del vector. Es decir, no es lo mismo velocidad constante que rapidez constante.

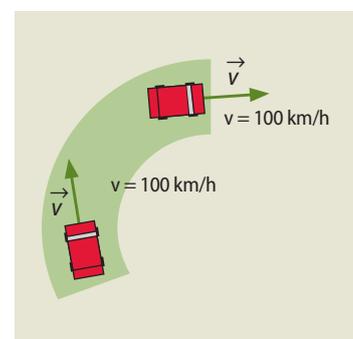
Durante un viaje, la rapidez del vehículo suele ser diferente en momentos distintos. Si bien es posible decir que un auto que recorre 200 km en dos horas tiene una velocidad cuyo valor medio es de 100 km/h, seguramente ese valor no se mantiene constante a lo largo de todo el recorrido. En algunos tramos la rapidez disminuye y en otros, aumenta. Por ello, se dice que la rapidez así obtenida es una **rapidez media**. Para determinar el valor de la velocidad en un instante cualquiera, se puede calcular la distancia recorrida en intervalos de tiempo cada vez más pequeños, de tal manera que dicha distancia también es muy pequeña. Si los intervalos de tiempo transcurrido son casi nulos, entonces la velocidad varía muy poco. Si se toman intervalos de tiempo infinitamente pequeños, tendiendo su longitud a cero, entonces la velocidad calculada es igual a la **velocidad instantánea**, cuya expresión matemática es:

$$\vec{v}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

donde  $\Delta \vec{r}$  representa la rapidez media en el intervalo  $\Delta t$ .

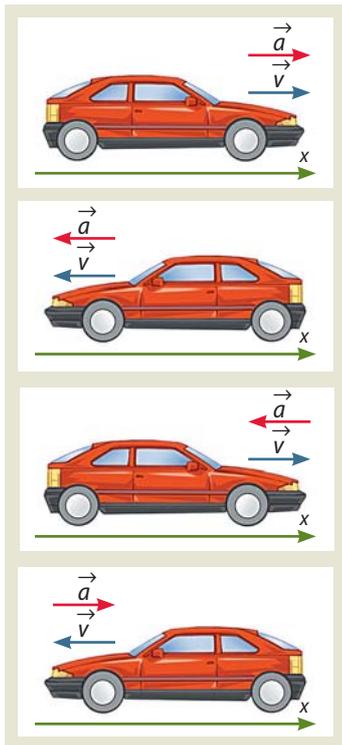
● Se llama **rapidez** al módulo o valor del vector velocidad en un instante determinado. La rapidez es siempre un número positivo.

▶ Una unidad muy utilizada en navegación es el **nudo**, que equivale a una milla náutica por hora, es decir 1852 m/h, o 1,852 km/h.



Es posible observar en este caso que ambos automóviles tienen una rapidez de 100 km/h pero las velocidades son diferentes.

▶ Los vectores no tienen signo. En realidad no hay velocidad ni aceleración positivas o negativas, pero al hacer referencia a un eje se puede convenir que si el sentido del vector coincide con el del eje, se toma como positivo y, en caso contrario, como negativo.



Un auto desacelera cuando los vectores aceleración y velocidad tienen signos contrarios, y aumenta el valor de la velocidad cuando sus signos son iguales.

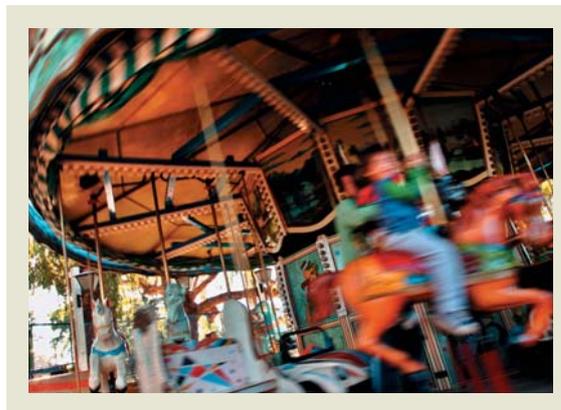
## Aceleración

Para desplazar una caja que está en reposo o detener un carrito en movimiento, es necesario ejercer una fuerza neta.

En general, para cambiar la rapidez de un cuerpo, es decir acelerarlo, hay que aplicarle una fuerza neta. Los conceptos de fuerza y aceleración están íntimamente ligados. Si un cuerpo se acelera, entonces una fuerza neta actúa sobre él, y viceversa.

Por ejemplo, cuando el conductor de un automóvil intenta pasar a otro en la ruta, aprieta el acelerador para lograrlo en el menor tiempo posible. En el lenguaje cotidiano, acelerar solamente significa aumentar la rapidez en el tiempo. En el lenguaje de la Física, la **aceleración** es un vector que expresa el cambio del vector velocidad en el tiempo. Este vector puede variar por tres razones: porque varía la rapidez del móvil, porque varía su dirección, o porque varían ambos. En los tres casos, se dice que el móvil aceleró.

Si se observa un niño en una calesita puede notarse que rota con una rapidez aproximadamente constante en cada punto de su trayectoria. Sin embargo, el niño está siendo acelerado porque su velocidad cambia punto a punto, ya que varía la dirección del vector velocidad.



## Aceleración media e instantánea

La magnitud que informa acerca del cambio del vector velocidad en un intervalo de tiempo es el vector **aceleración media**, cuya expresión matemática es:

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$$

donde  $\vec{v}$  es la velocidad final en un intervalo de tiempo,  $\vec{v}_0$  es la velocidad inicial y  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido.

La unidad de aceleración es una unidad derivada que se obtiene al dividir una unidad de velocidad por una de tiempo. En el Sistema Internacional, es el metro por segundo al cuadrado:  $\frac{\text{m/s}}{\text{s}} = \text{m/s}^2$ .

Por ejemplo, una aceleración de  $3 \text{ m/s}^2$  indica que el móvil varía el valor de su velocidad en  $3 \text{ m/s}$  por cada segundo de movimiento. Si estaba inicialmente detenido, al cabo de 1 segundo alcanzará una rapidez de  $3 \text{ m/s}$ ; a los 2 segundos de  $6 \text{ m/s}$ ; y así sucesivamente.

Cuando el intervalo de tiempo transcurrido es infinitamente pequeño, se hace referencia a la **aceleración instantánea**, cuya expresión matemática es:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$$

Si la aceleración de un movimiento es constante, sus valores instantáneos y medios son iguales.



6. Calculen la aceleración media de un auto que parte del reposo, describe una trayectoria rectilínea y alcanza una rapidez de  $100 \text{ km/h}$  en 9 segundos.
7. Un automóvil que se desplaza a  $100 \text{ km/h}$  frena de modo tal que el valor de su desaceleración media es de  $3 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuánto tarda en detenerse?

## Movimientos rectilíneos

Un **movimiento rectilíneo** es aquél que describe una trayectoria en línea recta. Entre estos encontramos los siguientes.

### Movimiento Rectilíneo Uniforme (MRU)

En este movimiento, el vector velocidad es constante en todo el trayecto. El móvil realiza iguales desplazamientos en iguales intervalos de tiempo. Estos movimientos son raros, por ejemplo los cuerpos en sistemas tirados por motores eléctricos como los tramos rectos de la cinta transportadora de valijas en un aeropuerto o líneas de envase, pero hay otros casos en los que su variación puede considerarse insignificante a lo largo del recorrido.

### Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado (MRUV)

Es un movimiento rectilíneo en el que la aceleración es constante. En este grupo también se incluyen los movimientos de ascenso y descenso perfectamente verticales en campos gravitatorios uniformes como sucede en la Tierra cuando se puede despreciar el rozamiento con el aire. Estos últimos movimientos se denominan  **tiro vertical**  y  **caída libre**  respectivamente.

## La ecuación horaria de los movimientos rectilíneos

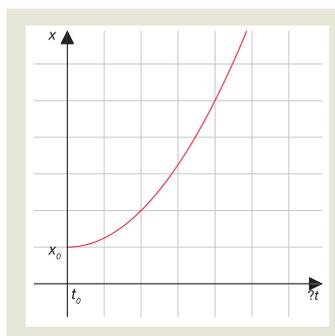
Se denomina **ecuación horaria** a aquella que permite describir el movimiento de un cuerpo en función del tiempo a partir de determinadas condiciones iniciales conocidas. Estas condiciones son las variables fijadas en el instante inicial: posición inicial, velocidad inicial y aceleración. A partir de la ecuación, y conocidas las condiciones iniciales del problema, es posible determinar con precisión la posición de un cuerpo en el instante que se desee. De esta manera, las ecuaciones horarias se transforman en herramientas muy potentes de la Física, que permiten predecir desde la posición de un planeta o de un cometa dentro de 100 años, hasta la de una pelota de béisbol luego de una décima de segundo de haber sido impulsada por el bate.

La ecuación horaria que describe un movimiento rectilíneo uniformemente variado (MRUV) es la siguiente:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2 = x_0 + v_0 \cdot (t - t_0) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t - t_0)^2$$

donde  $x(t)$  expresa el valor de la posición en un instante de tiempo  $t$  cualquiera,  $x_0$ ,  $v_0$ ,  $t_0$  y  $a$  son las condiciones iniciales de posición, velocidad, tiempo y aceleración respectivamente.

Al analizar la forma funcional de la ecuación horaria, es posible identificar la misma estructura de la función cuadrática, siendo en este caso la variable  $\Delta t$ , el tiempo transcurrido. Se deduce, entonces, que la gráfica de la posición en función del tiempo para un movimiento rectilíneo con aceleración constante no nula (MRUV) es necesariamente una parábola.



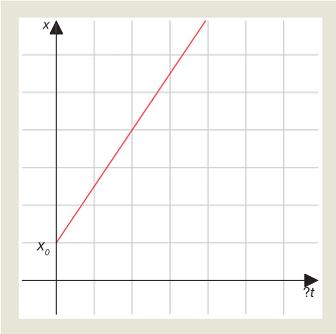
Las embotelladoras de bebidas son un ejemplo de movimiento rectilíneo uniforme.

### ● Velocidad y rapidez en los movimientos rectilíneos

En los movimientos rectilíneos, tanto la velocidad como la aceleración se representan por vectores cuya dirección coincide con la trayectoria. Por esa razón se suele usar la palabra **velocidad** en lugar de **rapidez**. Por ejemplo, si un móvil se desplaza sobre el eje  $x$  en el sentido positivo con una rapidez de 5 m/s se puede indicar que  $v = 5$  m/s, ya que se conoce la dirección y sentido del vector velocidad, esto es, hacia las  $x$  positivas, y además que su valor es de 5 m/s.

En el caso particular de un movimiento rectilíneo en el cual la aceleración es nula, y por lo tanto la velocidad es constante, la velocidad inicial coincide con la velocidad en todo instante. Luego, cuando la aceleración es cero, el movimiento es rectilíneo y uniforme, (MRU) y su ecuación horaria es:

$$x(t) = x_0 + v \cdot \Delta t$$



Gráfica correspondiente a la ecuación horaria de un movimiento rectilíneo uniforme.

La ecuación horaria de un MRU en función de tiempo es una función lineal, cuya ordenada al origen es la posición inicial ( $x_0$ ) del móvil y la pendiente de la recta es la velocidad  $v$ .

Si se despeja la velocidad se obtiene que:

$$v = \frac{x(t) - x_0}{\Delta t}$$

De esta forma, la velocidad de un cuerpo que describe un MRU puede calcularse como el cociente entre el desplazamiento y el tiempo transcurrido. Esta última fórmula indica el valor de la velocidad en cada instante, solo cuando ella es constante.

Si el movimiento es uniformemente variado, entonces la velocidad varía constantemente y esa variación está dada por la aceleración. Como la variación de velocidad es constante, la velocidad instantánea se puede calcular despejándola de la ecuación de aceleración:

$$v = v_0 + a \cdot \Delta t$$

## Aplicaciones de las ecuaciones horarias

- a. Un auto que se encuentra inicialmente en reposo recorre una distancia de 32 m en línea recta con una aceleración constante de  $4 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuánto tiempo tarda?
- b. Grafiquen la posición del auto en función del tiempo, la velocidad en función del tiempo y la aceleración en función del tiempo en dicho intervalo.

En este caso, dado que existe una aceleración constante, el movimiento es un MRUV. La ecuación horaria correspondiente a este movimiento es  $x(t) = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2$ .

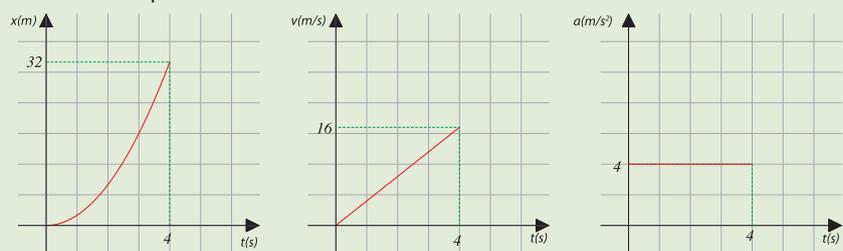
De ella se tienen los siguientes datos:  $x_0 = 0 \text{ m}$ ,  $t_0 = 0 \text{ s}$ ,  $v_0 = 0 \text{ m/s}$ ,  $x(t) = 32 \text{ m}$ ,  $a = 4 \text{ m/s}^2$ ,  $\Delta t = t - t_0 = t$  y es necesario calcular  $t$ . Si se reemplazan los datos en la ecuación, se obtiene:

$$32 \text{ m} = 0 \text{ m} + 0 \text{ m/s} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot 4 \text{ m/s}^2 \cdot t^2 \Rightarrow t^2 = 2 \text{ m/s}^2 \cdot t^2 \Rightarrow t^2 = \frac{32 \text{ m}}{2 \text{ m/s}^2} \Rightarrow t^2 = 16 \text{ s}^2$$

Por lo tanto, se obtienen dos soluciones posibles:  $t_1 = 4 \text{ s}$  o  $t_2 = -4 \text{ s}$ .

Sin embargo, en este caso, como el tiempo no puede ser negativo, solo es válida una solución con significado físico. El auto tarda entonces 4 segundos en recorrer 32 m.

Los gráficos que representan la posición, la velocidad y la aceleración del auto en función del tiempo son:



**8.** Una persona pasa por el origen de coordenadas en  $t = 0 \text{ s}$  moviéndose en línea recta y con velocidad constante de valor  $1,5 \text{ m/s}$ . Calculen su posición luego de 5 segundos.

**9.** Calculen el valor de la aceleración constante de un atleta durante la partida de una carrera, sabiendo que cuando el cronómetro marcaba 2 segundos se encontraba a 15 m de la largada.

## Caída libre y tiro vertical

Se denomina **caída libre** al movimiento de caída perfectamente vertical que experimenta un cuerpo bajo la sola acción de la fuerza gravitatoria. El valor de la aceleración de este movimiento es constante y en el caso de la Tierra, la aceleración gravitatoria a la que están sometidos todos los cuerpos puede considerarse con un valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Es decir, en un movimiento de caída libre, la rapidez de un cuerpo aumenta a razón de  $9,81 \text{ m/s}$  por cada segundo que transcurre durante su caída.

El **tiro vertical**, en cambio, es un movimiento ascendente perfectamente vertical que experimenta un cuerpo luego de haber sido impulsado hacia arriba, bajo la sola acción de la fuerza gravitatoria. Dicho cuerpo se encuentra sometido a la aceleración gravitatoria que va frenándolo hasta detenerlo; por eso, es nulo el valor de su velocidad en el instante en que alcanza su máxima altura.

Los movimientos de caída libre y de tiro vertical son casos particulares de movimientos rectilíneos uniformemente variados, y pueden ser descriptos mediante la ecuación horaria correspondiente. En situaciones reales, en la Tierra tanto en el movimiento de tiro vertical como en el de caída libre, además de la fuerza gravitatoria actúan otras fuerzas, entre las cuales la de rozamiento con el aire es la más importante, y retarda el movimiento. Sin embargo, bajo ciertas condiciones (aerodinamia, distancia reducida, ausencia de vientos, etc.) las ecuaciones representan muy satisfactoriamente dichos movimientos.

Un aspecto muy importante para destacar es que en las ecuaciones horarias no figura la masa del cuerpo en movimiento. Esto implica que no importa si el objeto posee una gran masa o una muy pequeña. Ambos cuerpos caen simultáneamente si se los suelta desde la misma altura en condiciones en que se pueda despreciar el rozamiento con el aire. Esta idea fue formulada por Galileo Galilei, quien según se cuenta aunque no hay prueba de ello, habría dejado caer dos cuerpos de masas muy diferentes desde lo alto de la Torre de Pisa, en Italia. El cuerpo de mayor masa habría caído casi al mismo tiempo que el de masa menor, y no mucho antes como se sostenía hasta entonces. Hace ya algunas décadas, el astronauta estadounidense Scott dejó caer en el mismo instante un martillo y una pluma sobre la superficie lunar. Para asombro de los televidentes, ambos llegaron prácticamente al mismo tiempo al suelo, dado que allí no hay atmósfera que ofrezca resistencia a la caída.

## Aplicaciones de los movimientos de caída libre y tiro vertical

Calculen la altura desde la que debe dejarse caer un objeto para que llegue al suelo al cabo de 3 segundos.

Si se toma arbitrariamente el origen de referencia en el suelo y el sentido positivo hacia arriba, de la ecuación horaria tomada con respecto al eje vertical y se tiene que:

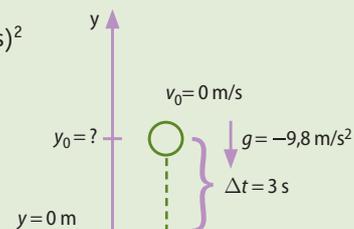
$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2$$

Si se reemplazan los datos:

$$0 \text{ m} = y_0 + 0 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} + \frac{1}{2} \cdot (-9,81 \text{ m/s}^2) \cdot (3 \text{ s})^2$$

Por lo tanto, la altura  $y_0$  desde la cual debe soltarse el objeto es:

$$y_0 = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 9 \text{ s}^2 = 44,14 \text{ m}$$



▶▶ El valor de la **aceleración gravitatoria terrestre** no es, en realidad, constante; presenta leves variaciones de acuerdo con la altura y la latitud del lugar. Para los cálculos se la considera  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

▶▶ Se denomina **fuerza gravitatoria** a la fuerza de atracción entre dos cuerpos por el solo hecho de poseer masa.

**10.a.** ¿Qué distancia recorre un objeto que se deja caer desde una altura de 35 m luego de 2 segundos de caída?

**b.** ¿Cuál es su rapidez en dicho instante?

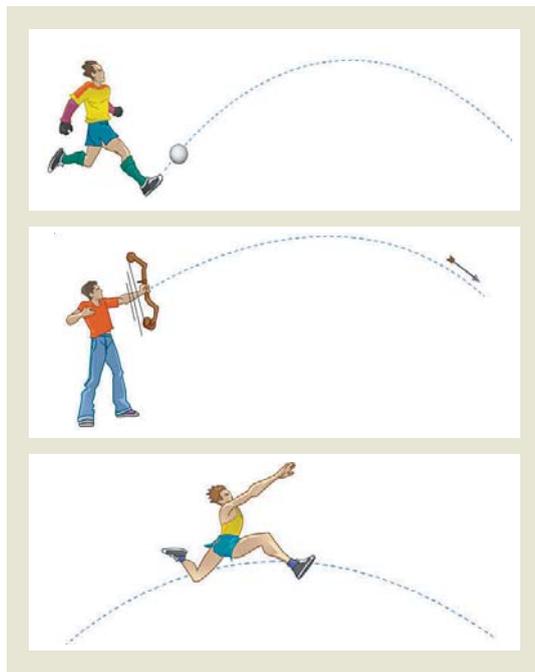
**11.** Una piedra que se suelta desde la superficie de un pozo tarda 0,3 segundos en llegar al fondo. ¿Qué profundidad tiene el pozo?

**12.** ¿Con qué rapidez inicial debe lanzarse verticalmente hacia arriba un objeto para que alcance una altura de 10 m en 3 segundos?

**13.** ¿Qué altura máxima alcanza un objeto que es lanzado verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial de 5 m/s desde una altura inicial de 1,20 m?



## Tiro oblicuo



La trayectoria de una pelota de fútbol, el salto en largo de un atleta, el movimiento de una flecha en el aire y la caminata de un astronauta en la superficie lunar comparten el mismo tipo de trayectoria parabólica.

Este tipo de movimiento producido al impulsar un cuerpo en dirección no vertical en una región de aceleración gravitatoria constante se denomina **tiro oblicuo**.

Para estudiar un tiro oblicuo es posible proyectarlo sobre dos ejes  $x$  e  $y$ , y luego analizarlo como si fuera la composición de dos movimientos, uno sobre cada eje. Si se considera que la

resistencia que ofrece el aire por rozamiento es pequeña, no actúa ninguna fuerza sobre el cuerpo en la dirección horizontal y, por lo tanto, no está acelerado en esa dirección. Por esa razón, la velocidad horizontal es constante. En cambio, la velocidad vertical ( $v_y$ ) varía debido a la aceleración gravitatoria que experimenta dicho cuerpo. El tiro oblicuo se puede considerar en ese caso como si fuese un movimiento compuesto por un movimiento rectilíneo uniforme en la dirección horizontal, y un movimiento rectilíneo uniformemente variado en la dirección vertical.

Para cualquier ángulo de lanzamiento, el tiempo que tarda el cuerpo en alcanzar su altura máxima es el mismo que tarda en caer desde dicha altura hasta el nivel del que fue lanzado. Esto ocurre dado que tanto durante el ascenso como en la caída, la aceleración gravitatoria es la misma y está dirigida siempre con sentido al centro de la Tierra, frenándolo en su ascenso y aumentando su rapidez en su descenso en la misma proporción. Por lo tanto, la rapidez con la que el móvil llega a su altura inicial es igual que la que tenía al inicio del movimiento.

En el caso de la actividad experimental que aquí se presenta, ambas monedas tardan el mismo tiempo en caer dado que el movimiento descrito por cada una de ellas es de caída libre en el eje vertical. Si bien en la primera situación la velocidad horizontal es de menor intensidad que en la segunda, la velocidad inicial en la dirección vertical es cero en las dos situaciones. Como, además, las dos monedas se encuentran a la misma altura inicial, ambas llegan al suelo en el mismo tiempo. Otra manera de efectuar el experimento consiste en dejar caer una moneda al suelo al mismo tiempo que se lanza horizontalmente otra desde la misma altura. Ambas llegarán simultáneamente al suelo.

En la realidad, el rozamiento con el aire influye en la trayectoria de los cuerpos, deformando la parábola. Esta deformación se hace más notoria cuando los cuerpos se desplazan a altos valores de velocidad.

### Tiempo de caída

#### Materiales

Dos monedas. Una mesa.

#### Procedimiento

1. Apoyen las monedas cerca del borde de la mesa.
2. Denle un pequeño impulso con el dedo a una de ellas de manera que caiga al suelo.
3. ¿Qué movimiento describe su trayectoria durante un tiempo  $t_1$ ?
4. Denle un impulso mayor a la segunda moneda; describirá una parábola de mayor alcance.

Luego de realizar el experimento, respondan.

El tiempo  $t_2$  que tarda en alcanzar el suelo la segunda moneda, ¿es mayor o menor que  $t_1$ ? ¿Por qué?

Propongan una hipótesis y luego contrástenla empíricamente arrojando ambas monedas simultáneamente desde el borde de la mesa, pero con impulsos horizontales diferentes.



## Movimiento circular uniforme

Un cuerpo describe un **movimiento circular** cuando su trayectoria es una circunferencia completa o un arco de circunferencia. Son ejemplos de este movimiento la trayectoria de una piedra que gira atada a un extremo de una cuerda, o la de una pesa sostenida en una mano durante un ejercicio de bíceps mediante el movimiento de flexión del codo.

Si, además, la rapidez del cuerpo a lo largo de su trayectoria circular es constante, entonces realiza un **movimiento circular uniforme** (MCU).

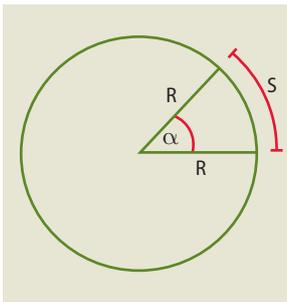
### Medición de ángulos

Un ángulo puede medirse en grados o en radianes. En Física se utiliza habitualmente el **radián**, que es la unidad angular en el Sistema Internacional.

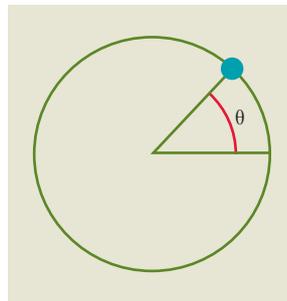
Matemáticamente, el ángulo en radianes se calcula como:

$$\alpha = \frac{S}{R}$$

donde S es la longitud del arco de circunferencia de radio R y cuyo ángulo central es  $\alpha$ .



El radián es adimensional, dado que es un cociente entre longitudes. Por esta razón un ángulo medido en radianes no lleva unidades, aunque a veces se lo indica con el símbolo rad.



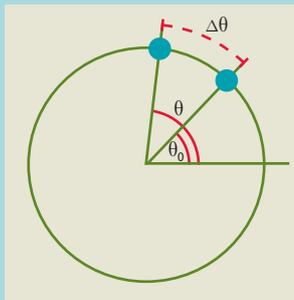
### Desplazamiento angular

Para indicar la posición angular de un objeto que describe una trayectoria circular de radio R, es suficiente con especificar el ángulo que forma con respecto al ángulo cero tomado como referencia.

El **desplazamiento angular** se define como el cambio de posición angular de un cuerpo. La expresión matemática es:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0$$

donde  $\theta$  es la posición angular final y  $\theta_0$  la posición angular inicial.



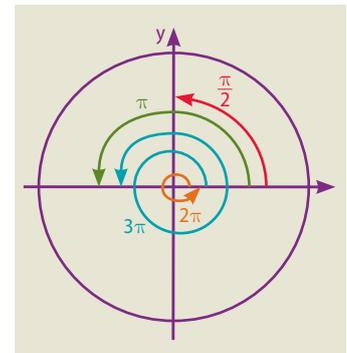
● **Un radián** es un ángulo cuyo arco S tiene una longitud igual a la del radio R de la circunferencia. Si la longitud del arco es igual a la del radio, entonces el ángulo es igual a 1 radián. Este ángulo corresponde aproximadamente a un ángulo de  $57,3^\circ$ .

● Como una circunferencia completa tiene por arco su perímetro y por ángulo central  $360^\circ$ , se tiene que:

$$360^\circ = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi$$

El valor de otros ángulos puede obtenerse simplemente por proporcionalidad. Así, por ejemplo:

Grados	Radianes
$0^\circ$	0
$30^\circ$	$\frac{\pi}{6}$
$45^\circ$	$\frac{\pi}{4}$
$60^\circ$	$\frac{\pi}{3}$
$90^\circ$	$\frac{\pi}{2}$
$180^\circ$	$\pi$
$360^\circ$	$2\pi$



## Velocidad angular

En un movimiento circular uniforme, un cuerpo describe iguales desplazamientos angulares en iguales intervalos de tiempo. En este movimiento, la **velocidad angular** es el cociente entre el desplazamiento angular y el tiempo transcurrido. Su valor es constante y expresa el desplazamiento angular realizado por unidad de tiempo. Cuanto mayor es el valor de la velocidad angular del cuerpo, mayor es el ángulo barrido por unidad de tiempo. La expresión matemática de la velocidad angular de un MCU es:

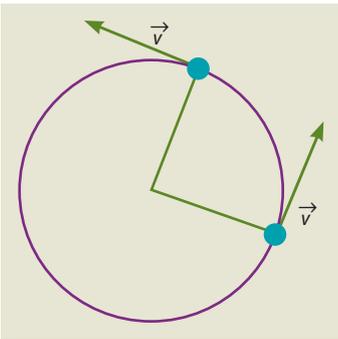
$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Como  $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ , entonces **la ecuación horaria para un MCU** es:

$$\theta = \theta_0 + \omega \cdot \Delta t$$

donde  $\omega$  es la velocidad angular,  $\theta$  es la posición angular final,  $\theta_0$  la inicial y  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido.

Dado que la unidad de desplazamiento angular es adimensional y la unidad de tiempo es el segundo, la unidad de rapidez angular en el SI es el  $s^{-1}$ .



Velocidad tangencial.

## Velocidad tangencial

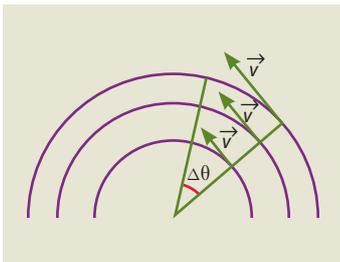
Un cuerpo en movimiento circular uniforme presenta una velocidad angular con respecto al centro de rotación que representa el ángulo barrido por unidad de tiempo. También una velocidad que es tangencial a la trayectoria y que cambia de dirección en cada punto de ella, aunque su valor numérico o rapidez se mantiene constante. Esta velocidad es conocida como **velocidad tangencial**, o simplemente como velocidad del cuerpo.

Por ejemplo, en el acto inaugural de los Juegos Olímpicos, es común observar a los atletas de los países participantes desfilando sobre la pista. Al efectuar la curva, los que se desplazan por el carril exterior lo hacen a una rapidez tangencial mayor que los que caminan por el andarivel interior. En ambos casos los atletas tienen igual velocidad angular, dado que recorren el mismo ángulo en el mismo tiempo para mantenerse uno al lado del otro. Sin embargo, cuanto mayor es la distancia al centro de rotación, mayor el arco de circunferencia que describen y también es mayor la rapidez que deben desarrollar para no retrasarse. El valor de la velocidad angular es el mismo en ambos casos, pero la rapidez no lo es.

La relación matemática entre el valor de la velocidad tangencial y el de la velocidad es:

$$v = \omega \cdot R$$

donde  $\omega$  es la velocidad angular y  $R$  el radio de rotación.



En cada caso, la velocidad angular es la misma, pero la rapidez no lo es.

Es posible observar que para imprimir una rapidez mayor a la pelota de fútbol, conviene disponer la pierna extendida en el momento del contacto del pie con el balón. De esta manera, el pie adquiere la máxima velocidad por encontrarse a la máxima distancia de la cadera, que es el centro alrededor del cual rota la extremidad inferior. Para aumentar la rapidez de un objeto, en muchos deportes se utilizan elementos que prolongan la distancia desde el centro de rotación, en general alguna articulación del cuerpo humano. Por ejemplo, la raqueta que permite la extensión del brazo del tenista, el bate de béisbol, o el palo de golf.

## Aceleración centrípeta



Sobre un cuerpo que describe un movimiento circular uniforme, la rapidez es constante. Sin embargo, dado que la dirección del vector velocidad cambia en cada punto de su trayectoria, el cuerpo se encuentra acelerado radialmente hacia el centro de la circunferencia. Esta aceleración recibe el nombre de **aceleración centrípeta** y se observa, por ejemplo, al hacer girar una piedra atada de un hilo. La fuerza que ejerce la mano hacia el centro de rotación provoca una aceleración en el mismo sentido que dicha fuerza, obligando a la piedra a cambiar la dirección de su velocidad en cada punto de la trayectoria. Cuando la cuerda se corta, la piedra sale disparada en la dirección tangencial al movimiento. La expresión matemática de esta aceleración centrípeta es:

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

donde  $v$  es la rapidez y  $R$  el radio de rotación.

La aceleración centrípeta es, entonces, directamente proporcional al cuadrado de la rapidez e inversamente proporcional al radio de rotación.

Por ejemplo, cuando un automóvil toma una curva, experimenta una aceleración centrípeta mayor cuanto mayor es la rapidez del vehículo. Si la rapidez aumenta al doble, la aceleración centrípeta aumenta 4 veces. Y cuanto más cerrada toma dicha curva, mayor es la aceleración radial que experimenta, dado que disminuye el radio de giro. Ésta es la aceleración centrípeta que experimentan los ocupantes sentados contra la puerta del auto en el momento de tomar una curva.

## Período y frecuencia del movimiento circular

Se denomina **período** del movimiento circular al tiempo que tarda un cuerpo en pasar dos veces consecutivas por la misma posición. Es decir, al tiempo que tarda en realizar una vuelta completa alrededor del centro de rotación. Se simboliza con la letra  $T$  y su unidad en el SI es el segundo.

Se llama **frecuencia** a la cantidad de veces que un cuerpo pasa por la misma posición en una unidad de tiempo. Se simboliza con la letra  $f$ . La frecuencia se calcula como:

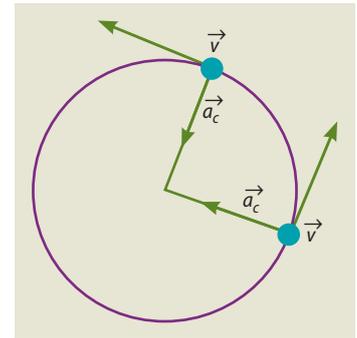
$$f = \frac{\text{cantidad de vueltas}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

Dado que el número de vueltas es adimensional y el tiempo se mide en segundos, la unidad de frecuencia en el SI es  $s^{-1} = 1/s$ . Esta unidad recibe el nombre de **hertz** (Hz). Por ejemplo, un cuerpo que efectúa cinco vueltas por segundo tiene una frecuencia de 5 Hz.

El período y la frecuencia están relacionados. Un cuerpo que realiza tres vueltas por segundo, tarda  $\frac{1}{3}$  de segundo en realizar una vuelta completa y viceversa. Un cuerpo que tarda  $\frac{1}{10}$  de segundo en hacer un giro completo, realiza 10 vueltas por segundo. Esto significa que la frecuencia es igual al inverso del período, y viceversa. Es decir,

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

donde  $T$  es el período y  $f$  la frecuencia.



Aceleración centrípeta.



**14.** Una barra rígida de 50 cm de longitud rota alrededor de un eje que pasa por uno de sus extremos barriendo un ángulo de  $60^\circ$  en dos segundos.

- ¿Cuál es el valor de la velocidad angular de un punto ubicado en el extremo libre de la barra?
- ¿Cuál es el valor de la velocidad angular de un punto ubicado en el centro de la barra?
- ¿Cuál es el valor de la velocidad de un punto ubicado en el extremo libre de la barra?
- ¿Cuál es el valor de la velocidad de un punto ubicado en el centro de la barra?

# Física en el deporte

*TODO DEPORTISTA EN UNA COMPETENCIA SE ENCUENTRA CONDICIONADO POR DIVERSAS VARIABLES INTERNAS Y EXTERNAS.*

Entre las variables internas pueden mencionarse su estado de ánimo, su confianza o su temperamento en un momento determinado. Entre las externas se encuentran aquellas que no dependen de él, sino de las condiciones físicas de la naturaleza. Las variables físicas como la presión, la temperatura o la altitud influyen necesariamente en el resultado obtenido. Entre las magnitudes físicas que afectan el desarrollo de una actividad deportiva, se destaca la aceleración gravitatoria terrestre. En realidad, el valor de la aceleración gravitatoria no es constante en distintos puntos de la Tierra ni a diferentes alturas cercanas a su superficie, aunque es muy similar. Dado que las diferencias no son apreciables cotidianamente, se toma un valor estándar aproximado de  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Existen, sin embargo, situaciones en las que estas pequeñas diferencias pueden afectar significativamente los resultados. Tal es el caso de los deportes de alto rendimiento, en los cuales muy pequeñas variaciones en el valor de la

aceleración gravitatoria pueden hacer la diferencia entre obtener un récord mundial o no. El valor de  $\vec{g}$  depende de la altura sobre el nivel del mar y de la latitud geográfica. A igual latitud, la aceleración gravitatoria disminuye con la altura. Por eso, un cuerpo que efectúa un tiro oblicuo tendrá un alcance mayor si se desplaza en un lugar de mayor altitud que en otro a nivel del mar, si en ambos casos el ángulo de salida, la altura con respecto al suelo y la velocidad inicial son los mismos. Esto se debe a que dicho cuerpo estará sometido a una aceleración menor en la dirección vertical del movimiento, y describe una parábola de mayor altura y también de mayor alcance. Por otro lado, a igual altitud, los cuerpos experimentan una aceleración gravitatoria menor en latitudes más cercanas al Ecuador que en los polos. Estas variaciones pueden llegar a producir diferencias de hasta 2 o 3 cm en el alcance de un cuerpo en movimiento parabólico, como una jabalina lanzada a gran distancia, o de varios milímetros en el salto en largo de un atleta olímpico.

Si bien todos los atletas que compiten en un mismo lugar son afectados por la aceleración gravitatoria de la misma manera, la diferencia entre los resultados en diferentes lugares del planeta permitiría a unos obtener un récord aun con un lanzamiento de menor calidad que otros efectuados en otras regiones. Diversos especialistas están de acuerdo en que es posible efectuar cálculos que tomen en cuenta las diferencias e introducir correcciones para determinar los verdaderos récords. Sin embargo, parece que el público y los atletas prefieren aceptar el resultado obtenido, en lugar de uno proveniente de cálculos que no se perciben directamente.

Latitud (°)	Valor de $g$ ( $\text{m/s}^2$ )
0	9,78
20	9,79
40	9,80
60	9,82
90	9,83

Altura (km)	Valor de $g$ ( $\text{m/s}^2$ )
0	9,81
20	9,75
40	9,69
60	9,63



Discutan en pequeños grupos y fundamenten su postura frente a la posibilidad de establecer correcciones para comparar los resultados obtenidos en diferentes lugares

geográficos y situaciones físicas ambientales. Presenten sus conclusiones al resto del curso.

# IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Se denomina **magnitud** a todo aquello que puede ser medido. Existen magnitudes escalares y vectoriales.
- La **posición** y el **movimiento** de traslación de un cuerpo se suelen describir a partir de la posición de su centro de masa.
- Todo movimiento es relativo, y depende del **sistema de referencia** elegido.
- El **desplazamiento** es una magnitud vectorial que se define como el cambio de posición de un cuerpo.
- La **rapidez** es una magnitud escalar que especifica el valor de la velocidad en un instante determinado.
- La **velocidad** es una magnitud vectorial y expresa la rapidez de un cuerpo y el sentido de su movimiento.
- La **aceleración** es una magnitud vectorial que expresa el cambio del vector velocidad por unidad de tiempo.
- El **movimiento rectilíneo uniforme** (MRU) es un movimiento rectilíneo con velocidad constante.
- El **movimiento rectilíneo uniformemente variado** (MRUV) es un movimiento rectilíneo con aceleración constante.
- El **movimiento circular uniforme** (MCU) es aquél cuya trayectoria es una circunferencia y se produce a velocidad angular constante. Es un movimiento acelerado radialmente hacia el centro de rotación.

## Fórmulas

$$\Delta x = x - x_0$$

Desplazamiento lineal en la coordenada  $x$

$$\vec{v}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Velocidad instantánea

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t}$$

Aceleración lineal

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2$$

Ecuación horaria del MRUV y del MRU (si  $a=0$ )

$$\theta = \theta_0 + \omega \cdot \Delta t$$

Ecuación horaria del MCU

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

Velocidad angular de un MCU

$$v = \omega \cdot R$$

Relación entre la velocidad angular y la velocidad en un MCU

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

Aceleración centrípeta

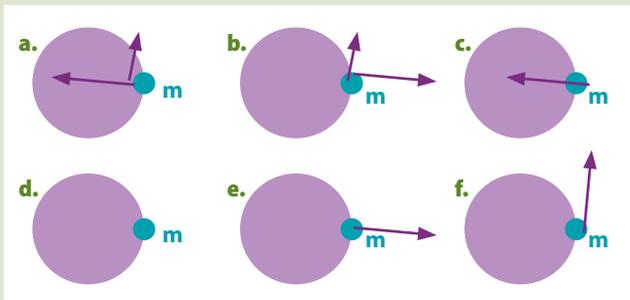
$$f = \frac{1}{T}$$

Relación entre el período y la frecuencia

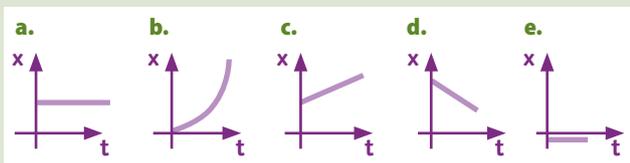
# ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

- 1.a. ¿Por qué razones fue propuesto el Sistema Internacional de Unidades?
- b. ¿Cuál es la diferencia entre velocidad y rapidez? ¿Y entre velocidad y aceleración?
- c. ¿Cuál es la diferencia entre los conceptos de desplazamiento y longitud recorrida?
- d. ¿Cuál es la diferencia entre los conceptos de trayectoria y desplazamiento?
- e. El velocímetro de un automóvil, ¿mide rapidez o velocidad?
- f. ¿Puede un objeto tener velocidad nula y aceleración no nula en el mismo instante?
- g. ¿Se anula la velocidad de un objeto lanzado verticalmente hacia arriba en su altura máxima? ¿Y en el caso de efectuar un tiro oblicuo?
- h. Dos atletas lanzan una jabalina, uno de ellos en Paraná y el otro en la ciudad de Salta, y ambos con la misma rapidez, ángulo y altura iniciales. ¿Cuál de ellos se encontrará más favorecido según el valor local de la aceleración gravitatoria?

2. Determinen cuál o cuáles de los siguientes esquemas representa satisfactoriamente la o las aceleraciones que actúan sobre el cuerpo de masa  $m$  en movimiento circular uniforme para un observador situado en el centro de la circunferencia.



3. Determinen y justifiquen cuál o cuáles de los siguientes gráficos corresponden a un MRU y cuál o cuáles a un MRUV.



4. Expresen los siguientes valores de velocidad en m/s:

- a. 80 km/h      b. 70 m/min      c. 500 cm/s

5. ¿Cuál es el valor de la aceleración media de un atleta que se mueve desde el reposo hasta alcanzar una rapidez de 10 m/s en 3,5 s?

6. Un automóvil desacelera en forma constante desde una rapidez inicial de 100 km/h hasta el reposo en 150 m. ¿Cuál es el valor de su aceleración?

7. El conductor de un automóvil que se desplaza a 20 m/s frena experimentando una desaceleración cuyo módulo es de  $5 \text{ m/s}^2$ .

- a. ¿Cuál es su distancia de frenado?  
b. ¿Cuánto tiempo tarda en detenerse?

8. Se deja caer una piedra desde lo alto de un puente. Si tarda 2 segundos en llegar al agua, ¿cuál es la altura del puente?

9. Se lanza una pelota verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial de 15 m/s. ¿Cuál es la altura máxima que alcanza y cuánto tiempo tarda en llegar hasta dicho punto?

10. Una nadador corre a 2 m/s y se arroja horizontalmente a un lago desde un peñasco. Si llega al agua 0,7 segundos después del despeque, ¿cuál es la altura del peñasco y cuál es el alcance?

11. Los famosos clavadistas de Acapulco se arrojan al agua desde una altura de unos 35 m. Para evitar chocar contra las rocas de la base, el salto debe tener un alcance mínimo de 5 m. ¿Cuál es la rapidez mínima que debe tener el clavadista para lograr un salto seguro?

12. ¿Cuál es el valor de la velocidad tangencial de un niño que se encuentra sobre una calesita, a 2 m del centro de rotación, y que realiza una vuelta completa en 7 s? ¿Cuál es su aceleración centrípeta?

13. La Luna describe una órbita completa aproximadamente circular de  $3,8 \cdot 10^8 \text{ m}$  de radio alrededor de la Tierra en 27,3 días. ¿Cuál es la velocidad tangencial de la Luna? ¿Y su aceleración centrípeta? Calculen su frecuencia y su período expresado en unidades del SI.

14. Estimen la rapidez del sonido en el aire.

15. Estimen la rapidez de marcha de un varón y de una mujer.

16. Diseñen y realicen un experimento para estimar el valor de la aceleración gravitatoria terrestre a partir de la ecuación horaria del MRUV.

17. Estimen la rapidez inicial con la que pueden arrojar una pelota verticalmente hacia arriba a partir de la medición del tiempo.

# AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son Verdaderas (V) o Falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- |    |  |                       |
|----|--|-----------------------|
| 1  | El volumen es una magnitud escalar.  | <input type="radio"/> |
| 2  | El centro de masa de un cuerpo siempre se encuentra en el centro geométrico de ese cuerpo.   | <input type="radio"/> |
| 3  | El centro de masa de un cuerpo puede estar fuera del propio cuerpo.  | <input type="radio"/> |
| 4  | El desplazamiento siempre coincide con la distancia recorrida por un cuerpo.   | <input type="radio"/> |
| 5  | El orden de magnitud de 1035 es $10^4$ .   | <input type="radio"/> |
| 6  | La rapidez es una magnitud siempre positiva.   | <input type="radio"/> |
| 7  | Un auto muy veloz necesariamente acelera muy rápidamente.  | <input type="radio"/> |
| 8  | Aceleración negativa significa que el cuerpo está frenando.  | <input type="radio"/> |
| 9  | La velocidad en la altura máxima de un tiro vertical es cero.  | <input type="radio"/> |
| 10 | La velocidad en la altura máxima de un tiro oblicuo es cero.   | <input type="radio"/> |
| 11 | La aceleración en la altura máxima de un tiro vertical es cero.  | <input type="radio"/> |
| 12 | La velocidad de un cuerpo siempre se calcula como el cociente entre su desplazamiento y el tiempo transcurrido.                              | <input type="radio"/> |
| 13 | El alcance en un tiro oblicuo es mayor cuanto menor sea el valor de la aceleración gravitatoria, partiendo de iguales condiciones iniciales. | <input type="radio"/> |
| 14 | A igual latitud, el valor de la aceleración gravitatoria terrestre disminuye con la altura.  | <input type="radio"/> |
| 15 | En un MRUV la aceleración es constante.  | <input type="radio"/> |
| 16 | En un MRU, la gráfica de la posición en función del tiempo es una parábola.  | <input type="radio"/> |
| 17 | Un cuerpo en MCU mantiene constante su velocidad en todo instante.   | <input type="radio"/> |
| 18 | El MCU es un movimiento acelerado.   | <input type="radio"/> |
| 19 | La rapidez tangencial de un cuerpo en MCU aumenta cuando su distancia al centro de rotación aumenta.   | <input type="radio"/> |
| 20 | La unidad de velocidad angular en el SI es el m/s.   | <input type="radio"/> |