

TEN EN CUENTA QUE:



- **Móvil.** Cuerpo en movimiento respecto a un sistema de referencia.
- **Móvil puntual.** Cuerpo, reducido a un solo punto, cuyas dimensiones son mucho más pequeñas que la distancia que recorre.
- **Sistema de coordenadas.** En general, las más utilizadas son las cartesianas, que en el plano se representan con dos ejes perpendiculares, el eje X o eje de abscisas y el eje Y o eje de ordenadas.

Y TAMBIÉN:



Para hacer un estudio completo del movimiento de un cuerpo, es necesario conocer en cada instante su posición respecto a un sistema de referencia dado.

I. MOVIMIENTO Y SISTEMAS DE REFERENCIA

La **cinemática** es la parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta la causa que lo produce. Para simplificar su estudio, se considera que los móviles son puntuales, es decir, con la masa concentrada en un punto y de volumen despreciable. Esta simplificación es válida para movimientos de traslación con cualquier trayectoria, sea rectilínea o no.

Imaginemos la siguiente situación: un pasajero se encuentra en el interior de un tren, mira a través de la ventana y observa cómo los bancos del andén se mueven hacia la cola del tren. ¿Podemos afirmar que realmente se están moviendo? Para responder a la pregunta, podemos considerar dos puntos de vista:

- Si estamos en el andén, veremos que los bancos **NO** se mueven.
- Si estamos en el tren, veremos que los bancos **SÍ** se mueven.

Así pues, podemos definir el movimiento de la siguiente forma:

El **movimiento** es el cambio de posición de un cuerpo en un tiempo determinado respecto a un punto de observación elegido.

Por lo tanto, para saber si un objeto se mueve, necesitamos un **sistema de referencia**.

Un **sistema de referencia** es un sistema de coordenadas cartesianas, más un reloj, respecto a los cuales describimos el movimiento de los cuerpos.

Siguiendo con el caso anterior, según el sistema de referencia escogido, el tren se moverá o no. Así, si elegimos como sistema de referencia los bancos del andén, el tren se mueve. Sin embargo, si escogemos como sistema de referencia los asientos del tren, este no se mueve. Por eso, decimos que el **movimiento es relativo** y depende del **sistema de referencia** utilizado.

SISTEMA DE REFERENCIA		
EN UNA DIMENSIÓN	Para determinar la posición de un móvil sobre una recta, bastará con un solo eje de coordenadas, OX. La posición del punto queda determinada por una coordenada, x.	
EN DOS DIMENSIONES	Para determinar la posición de un móvil en el plano, se necesita un sistema de dos ejes de coordenadas, OX y OY. La posición del punto queda determinada por dos coordenadas, x, y.	
EN TRES DIMENSIONES	Para determinar la posición de un móvil en el espacio, se necesita un sistema de tres ejes de coordenadas, OX, OY y OZ. La posición del punto queda determinada por las coordenadas x, y, z.	

■ Tabla 1.

1.1. Sistemas de referencia inerciales y no inerciales

Si viajamos de pasajeros en un auto y el conductor frena bruscamente, tendremos la sensación de ser empujados hacia delante. Según un sistema de referencia fijo en los asientos del auto, cuando el conductor pisa el pedal del freno, los ocupantes, en reposo según este referencial, empiezan a moverse.

En cambio, para un sistema de referencia fijo en la carretera, el auto y sus ocupantes están en movimiento antes de que el conductor frene. Y cuando frena, el auto se detiene mientras que sus ocupantes **mantienen su movimiento** un breve instante. Este sistema de referencia fijo o solidario a la carretera es un ejemplo de sistema de referencia inercial:

Un **sistema de referencia inercial** es aquel en el que se cumple la **ley de la inercia**. Respecto a este sistema de referencia, todo cuerpo mantiene su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme si sobre él no se realiza ninguna acción externa.

En caso contrario, hablamos de un sistema de referencia no inercial. Es el supuesto del sistema de referencia fijo en los asientos de un auto que está frenando. Respecto a este sistema, los pasajeros empiezan a moverse sin que actúe una fuerza.

Los sistemas de referencia inerciales están en **reposo** o bien **se mueven en línea recta y a velocidad constante** con respecto a cualquier otro sistema de referencia inercial.

Sabemos que la Tierra tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje y un movimiento de traslación en torno al Sol. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la **Tierra** se puede considerar como un sistema de referencia inercial.

El **sistema de referencia del laboratorio** es el sistema de referencia fijo, en el lugar donde se lleva a cabo un experimento físico determinado. En consecuencia, las magnitudes cinemáticas del experimento se miden con respecto a este sistema de referencia.

TEN EN CUENTA QUE:



- **Referencial.** Sistema de referencia.
- **Mecánica.** Parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos y la influencia de las fuerzas sobre el movimiento.
- **Inercia.** Propiedad de los cuerpos de no modificar su estado de reposo o de movimiento, si no es por la acción de una fuerza.

Y TAMBIÉN:



Después del frenado, los ocupantes del auto siguen en movimiento durante un instante, pero acaban deteniéndose debido a la acción de los cinturones de seguridad y de los asientos. Como estudiaremos en la unidad 2, estas «acciones» se denominan fuerzas.

TEN EN CUENTA QUE:



Un sistema de referencia en reposo con respecto a las denominadas estrellas fijas, objetos celestes que parecen no moverse en relación con el resto de las estrellas del firmamento, puede considerarse como un sistema de referencia inercial. De hecho, este fue el referencial que Isaac Newton utilizó en el siglo xvii para el desarrollo de la mecánica clásica.

Ejemplo 1

Indica si estos móviles constituyen un sistema de referencia inercial o no inercial:

- a. Una camioneta que circula en un tramo recto de autopista a $87 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- b. Una noria que gira a velocidad constante.

COMPRENSIÓN. Los sistemas de referencia inerciales son los que están en reposo o bien se mueven a velocidad constante y en línea recta con respecto a otro sistema de referencia inercial.

DATOS. a. trayectoria recta; $v = 87 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; b. giro; v constante.

RESOLUCIÓN. Consideramos la Tierra como un sistema de referencia inercial.

- a. Los ejes de coordenadas fijos a la camioneta constituyen un sistema de referencia inercial, porque esta se mueve en línea recta y a velocidad constante con respecto a la Tierra.
- b. Los ejes de coordenadas fijos a la periferia de la noria constituyen un sistema de referencia no inercial, ya que estos ejes no siguen un movimiento rectilíneo con respecto a la Tierra, sino que describen circunferencias.

Y TAMBIÉN:

La fuerza peso es la responsable de que, cerca de la superficie terrestre, los cuerpos que se dejan libres caigan en dirección al centro de la Tierra con la aceleración de la gravedad: $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

TEN EN CUENTA QUE:

El principio de relatividad de Galileo fue generalizado por A. Einstein (1879-1955) a todas las leyes de la física, y no solo a las de la mecánica.

Esto le llevó a desarrollar su **teoría de la relatividad**, en la que la medida del **tiempo** y de las **longitudes depende del sistema de referencia**.

En la **mecánica** clásica de Newton, válida para cuerpos macroscópicos que no se mueven a velocidades próximas a las de la luz, todos los **sistemas de referencia inerciales coinciden** en la medida del **tiempo** y de las **longitudes**.

1.2. Principio de relatividad de Galileo

Volvamos de nuevo al tren que circula al lado de un andén. Consideremos que el tren se mueve a velocidad constante en un tramo de vía recto. Si un pasajero, en reposo con respecto al tren, deja caer un objeto macizo, observará que este cae en línea recta en la dirección perpendicular al suelo del tren.

Lo mismo sucede para una persona quieta en el andén. Al soltar un objeto macizo en reposo, la persona del andén lo ve caer en línea recta en la dirección perpendicular al suelo del andén.

Según el sistema de referencia fijo en el tren, el movimiento causado por la fuerza peso sobre un objeto que se suelta en reposo es el mismo que según el sistema de referencia situado en el andén.

Este hecho es generalizable a todos los sistemas de referencia inerciales y a todas las leyes de la mecánica. Es el **principio de relatividad de Galileo**:

En todos los sistemas de referencia inerciales se cumplen las mismas leyes de la mecánica.

De acuerdo con este principio, el movimiento de un móvil es descrito de distinta forma desde dos **sistemas de referencia inerciales diferentes** (miden valores de posición y velocidad distintos), pero ambos referenciales **miden la misma aceleración del móvil**. En el apartado 4, estudiaremos la magnitud aceleración.

La persona del andén no ve caer el objeto del tren en línea recta, ya que el objeto, además de caer, se mueve con el tren. Lo mismo le sucede al pasajero del tren con respecto al objeto que cae en el andén. Sin embargo, ambos observadores miden la misma aceleración de caída del objeto soltado por el otro observador.

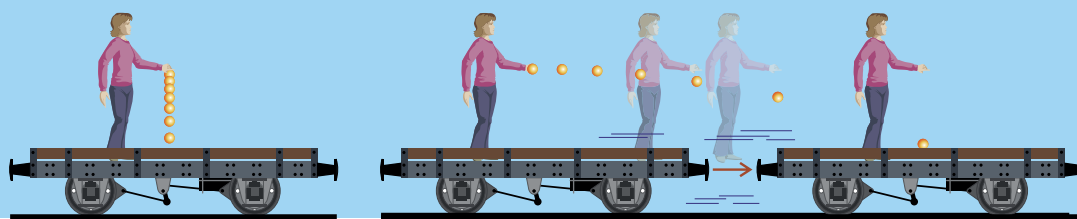


Fig. 1.

Observador en reposo

Observador en el andén

Según el principio de relatividad de Galileo, todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes entre sí, y es imposible distinguir mediante experimentos físicos si un sistema de referencia inercial se mueve o está en reposo. Es decir, **no se puede medir el movimiento absoluto**.

Así, en un tren que se mueve en línea recta y a velocidad constante, un pasajero no podría saber que el tren avanza por el resultado de ningún experimento físico. Muchos han observado que cuando el tren coincide junto a otro en la estación, al mirar por la ventana no es posible distinguir cuál de los dos se mueve. Solo puede asegurarse que existe un movimiento relativo entre ambos.

En la práctica, el traqueteo debido a las imperfecciones de la vía altera la dirección y la velocidad del tren, por lo que percibimos que nos estamos moviendo. Cuando el tren toma una curva, también notamos su movimiento. No obstante, en este caso, al variar la dirección de su velocidad, el tren ya no es un sistema de referencia inercial.

2. TRAYECTORIA, POSICIÓN Y DESPLAZAMIENTO

Las marcas que dejamos al caminar en la playa, las de un esquiador en la nieve o las estelas de un avión nos indican el camino seguido por la persona, el esquiador o el avión, respectivamente. Si visualizamos el rastro que el móvil deja por donde pasa, este rastro será la trayectoria.

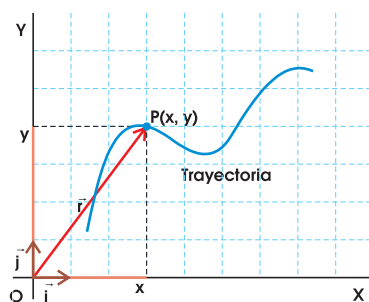
Así, a lo largo del tiempo, el móvil ocupa diferentes posiciones.

La **posición** de un móvil es el punto del espacio donde se encuentra en un instante determinado, es decir, respecto a un sistema de referencia.

Si el objeto se mueve en el plano, para describir la posición de cada punto de la trayectoria, necesitamos un sistema de referencia con los ejes OX y OY .

Dado un punto P de la trayectoria, este determina el vector OP con inicio en el origen de coordenadas y extremo en el punto P . El vector OP se llama vector de posición del punto P , y se simboliza por $\vec{r}$. Si la trayectoria está en un plano, se cumple:

$$\vec{OP} = \vec{r} = (x, y) = x\vec{i} + y\vec{j}$$



■ Fig. 2.

Fíjate en que las componentes de $\vec{r}$ son x e y , que son las proyecciones del vector sobre cada uno de los ejes de coordenadas, y coinciden con las coordenadas del punto P en el sistema de referencia que hemos tomado, mientras que $\vec{i}$ y $\vec{j}$ son los vectores unitarios correspondientes a cada eje.

El módulo del vector de posición es: $|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2}$. Y la unidad del módulo del vector de posición en el SI es el **metro (m)**.

En general, podemos expresar el vector de posición en función del tiempo

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$$

que es la ecuación del movimiento.

Las ecuaciones de las componentes del vector de posición en función del tiempo, $x = x(t)$, $y = y(t)$, son las **ecuaciones paramétricas** de $\vec{r}$.

Finalmente, si en una de las ecuaciones paramétricas se despeja la variable tiempo y se sustituye en la otra, resulta una función de x y de y . Es decir, se obtiene $F(x, y) = 0$, que es la **ecuación de la trayectoria**.

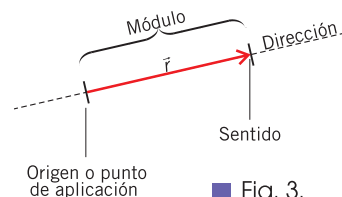
Y TAMBIÉN:



Trayectoria, posición y desplazamiento son conceptos relacionados, pero no idénticos. Es importante emplear correctamente y de forma habitual la terminología científica, pero también ser capaz de explicarla en un lenguaje cotidiano.

Un **vector** es un segmento orientado, que consta de los siguientes elementos:

- El **módulo** es la longitud del vector.
- La **dirección** es la recta sobre la que se encuentra el vector.
- El **sentido** se representa mediante la punta de la flecha e indica la orientación.
- El **punto de aplicación** es el lugar donde comienza y se aplica el vector.



■ Fig. 3.

Y TAMBIÉN:



En física, se utilizan mucho las letras griegas. El símbolo Δ (letra griega delta mayúscula) se lee como incremento, e indica la diferencia entre el estado final y el estado inicial.

TIC



Observa la diferencia entre distancia y vector desplazamiento:

<http://goo.gl/d3nVaM>

Desplazamiento

Consideremos dos puntos, P_0 y P , correspondientes a dos posiciones de un móvil a lo largo de su trayectoria. Si unimos estos dos puntos de la trayectoria mediante un vector, obtenemos el vector desplazamiento: $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$

El **vector desplazamiento**, $\Delta \vec{r}$ entre dos puntos, P_0 y P , es el vector con origen en P_0 y extremo en P .

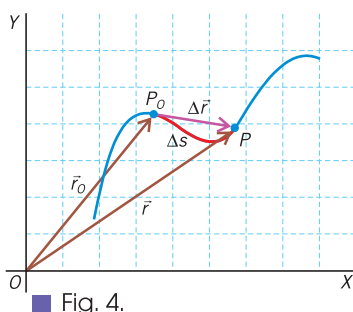


Fig. 4.

Cuando la trayectoria es una línea recta y no hay cambios de sentido, el módulo del vector desplazamiento, $\Delta \vec{r}$ coincide con la **distancia recorrida** por el móvil **sobre la trayectoria** (Δs). En cualquier otro caso, la distancia recorrida, Δs , es mayor que el módulo del vector desplazamiento, $\Delta \vec{r}$.

Ejemplo 2

El vector posición de una pelota que se ha lanzado a canasta viene dado, en función del tiempo, por la expresión $\vec{r} = 3t\vec{i} + (6t - 5t^2)\vec{j}$, en unidades del SI.

- Determina** la posición del móvil en los instantes $t = 0$ s, $t = 0,50$ s y $t = 1,0$ s.
- Calcula** la distancia del móvil respecto al origen de coordenadas en $t = 1,0$ s.
- Calcula** el vector desplazamiento entre los instantes de $t = 0,50$ s y $t = 1,0$ s.
- Determina** la ecuación de la trayectoria y dibújla.

COMPRESIÓN. Para hallar el valor del vector de posición en un instante dado, basta con sustituir el valor del tiempo en la ecuación del movimiento. La distancia al origen será el módulo del vector de posición, mientras que el desplazamiento entre dos instantes es la diferencia entre los vectores de posición.

DATOS. $\vec{r} = 3t\vec{i} + (6t - 5t^2)\vec{j}$, en unidades del SI.

RESOLUCIÓN.

- Hallamos el vector de posición en los instantes propuestos:

TIEMPO	VECTOR POSICIÓN	POSICIÓN
$t = 0$	$\vec{r}(0s) = 0$	$P_0(0; 0)$
$t = 0,50$	$\vec{r}(0,50s) = 1,5\vec{i} + 1,8\vec{j}$	$P_{0,5}(1,5; 1,8)$
$t = 1,0$	$\vec{r}(1,0s) = 3,0\vec{i} + 1,0\vec{j}$	$P_1(3,0; 1,0)$

- Calculamos la distancia del móvil respecto al origen de coordenadas cuando $t = 1,0$ s:

$$|\vec{r}(1,0 \text{ s})| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(3,0 \text{ m})^2 + (1,0 \text{ m})^2} = 3,2 \text{ m}$$

- Obtenemos el vector desplazamiento entre los 0,50 y 1,0 s:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}(1,0 \text{ s}) - \vec{r}(0,50 \text{ s}) = (1,5\vec{i} - 0,8\vec{j}) \text{ m}$$

$$\text{Su módulo es: } |\Delta \vec{r}| = \sqrt{(1,5 \text{ m})^2 + (0,8 \text{ m})^2} = 1,7 \text{ m}$$

- Determinamos la trayectoria a partir de las ecuaciones paramétricas del movimiento:

$$x(t) = 3t \rightarrow t = \frac{x}{3} ; y(t) = 6t - 5t^2 = 2x - \frac{5x^2}{9}$$

La ecuación de la trayectoria es una parábola:

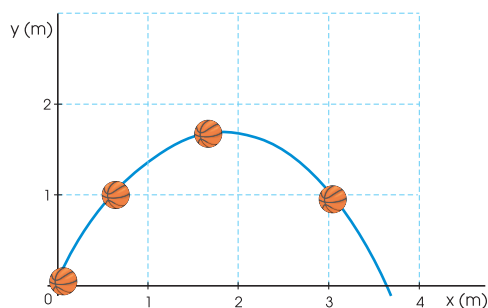


Fig. 5.

COMPROBACIÓN. La trayectoria es una parábola, como corresponde al lanzamiento de una pelota de baloncesto.

3. VELOCIDAD

Considera un autobús que efectúa el trayecto entre dos poblaciones, A y B, invirtiendo en el viaje un tiempo determinado. Según sea la relación entre el desplazamiento y el tiempo empleado, el autobús se mueve a mayor o menor **velocidad**.

La velocidad es una **magnitud vectorial** porque viene determinada por su módulo, dirección y sentido. Su unidad en el SI es el $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.1. Velocidad media

Analicemos los 100 metros lisos de Usain Bolt en las olimpiadas de Pekín 2008. Esta tabla muestra el tiempo marcado por el atleta cada 10 metros recorridos:

POSICIÓN (m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
TIEMPO (s)	0	1,85	2,87	3,78	4,65	5,50	6,32	7,14	7,96	8,79	9,69

■ Tabla 2.

Ante estos datos, podemos preguntarnos: ¿En qué tramos fue más veloz? ¿Durante cuánto tiempo? ¿A qué velocidad corrió de promedio? Para responder estas preguntas, definiremos las magnitudes **velocidad media** y **rapidez media**.

Consideremos el sistema de ejes coordenados de la figura de la derecha. En el instante t_0 , el móvil está en la posición P_0 de vector de posición $\vec{r}_0$, y en el instante t , el móvil está en el punto P de vector de posición $\vec{r}$.

La **velocidad media**, $\vec{v}_m$, es el cociente entre el vector desplazamiento, $\Delta\vec{r}$, y el tiempo transcurrido en ese desplazamiento, Δt :

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{t - t_0}$$

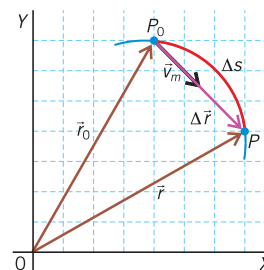
Por otra parte, la magnitud escalar rapidez media se define de la siguiente manera:

La **rapidez media** es el cociente entre la distancia recorrida sobre la trayectoria y el intervalo de tiempo transcurrido, $\Delta s / \Delta t$.

En un movimiento rectilíneo sin cambios de sentido, el vector desplazamiento y la longitud recorrida sobre la trayectoria coinciden, por lo que: $|\vec{v}_m| = \frac{\Delta s}{\Delta t}$



■ Bolt gana los 100 m lisos en Pekín 2008.



■ Fig. 6.

- Velocidad media entre P_0 y P. La velocidad media tiene la misma dirección y sentido que $\Delta\vec{r}$.

TIC



Observa un ejemplo de la diferencia entre rapidez media y velocidad media en:

Visita:

<http://goo.gl/MoYsDy>

Ejemplo 3

Una moto se desplaza 120 km hacia el norte en 2 horas, y luego 180 km hacia el este en 4 horas. Determina el vector velocidad media en:

a. El primer tramo; b. El recorrido total.

COMPRENSIÓN. Para calcular la velocidad media, solo nos interesan las posiciones final e inicial de nuestro móvil.

DATOS. $P_0(0, 0)$; $t_0 = 0 \text{ h}$; $\vec{r}_0 = (0, 0)$; $P_1(0, 120 \text{ km})$; $t_1 = 2 \text{ h}$; $\vec{r}_1 = (0, 120)$
 $P_2(180 \text{ km}, 120 \text{ km})$; $t_2 = 6 \text{ h}$; $\vec{r}_2 = (180, 120)$

RESOLUCIÓN. a. La velocidad media del primer tramo es: $\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_0}{t_1 - t_0} = \frac{120\vec{j} \text{ km}}{2 \text{ h}} = 60\vec{j} \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

b. En el recorrido total es: $\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_0}{t_2 - t_0} = \frac{(180\vec{i} + 120\vec{j}) \text{ km}}{6 \text{ h}} = (30\vec{i} + 20\vec{j}) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$