Movimiento Circular

El movimiento circular es un movimiento curvilíneo cuya trayectoria es una circunferencia. Son ejemplos: el movimiento de cualquier punto de un disco o una rueda en rotación, el de los puntos de las manecillas de un reloj. Como primera aproximación, es el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y del electrón alrededor del protón en un átomo de hidrógeno. Debido a la rotación diaria de la Tierra, todos los cuerpos que están en su superficie tienen un movimiento circular en relación con el eje de rotación de la Tierra.

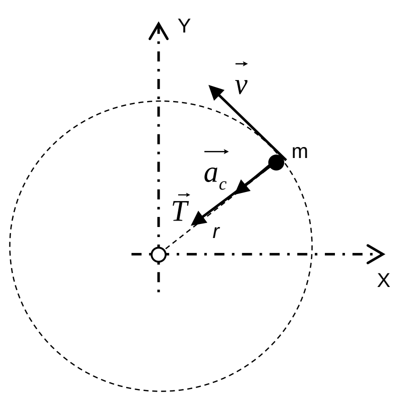
Movimiento Circular Uniforme

Imaginemos una partícula que se mueve en una trayectoria circular, con rapidez constante: al ser la trayectoria una curva el vector velocidad cambia su dirección en cada instante (es tangente a la trayectoria en cada punto), esto implica que:

$$v = \text{constante} \qquad \text{pero} \qquad \vec{v} \neq \text{constante}$$

Este movimiento recibe el nombre de Movimiento Circular Uniforme.

En el caso de una bola apoyada sobre una superficie horizontal lisa que gira en el extremo de una cuerda, la fuerza ejercida por ésta sobre la bola es la que obliga a la velocidad a cambiar de dirección en cada punto. El vector velocidad siempre es tangente a la trayectoria de la partícula y perpendicular al radio de la misma, es un vector de dirección variable y de módulo constante. Concluimos que debe existir una aceleración que mida el cambio de velocidad en cada intervalo de tiempo.

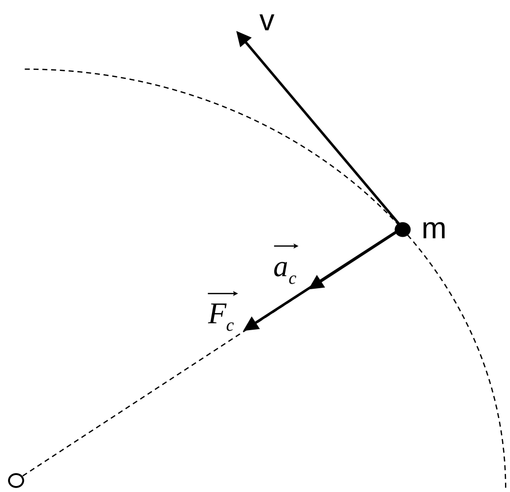


Si aplicamos la segunda ley de Newton a la partícula, resultará que la única fuerza no equilibrada es la que aplica la cuerda sobre la bola, por lo tanto:

$$\boxed{\sum \vec{F} = \vec{T} = m\vec{a}}$$

Obsérvese que el vector $\vec{a}$ tiene la dirección y sentido de la fuerza $\vec{T}$, por lo tanto es siempre perpendicular al vector $\vec{v}$ y se produce debido al cambio en la dirección del mismo.

Esta resultante de fuerzas (en la dirección radial) está dirigida hacia el centro de la trayectoria y se la suele llamar **Fuerza Radial o Centrípeta** $\left(\vec{F_c}\right)$, siendo la encargada de modificar la dirección de la velocidad, obligando a la partícula a seguir la trayectoria circular.

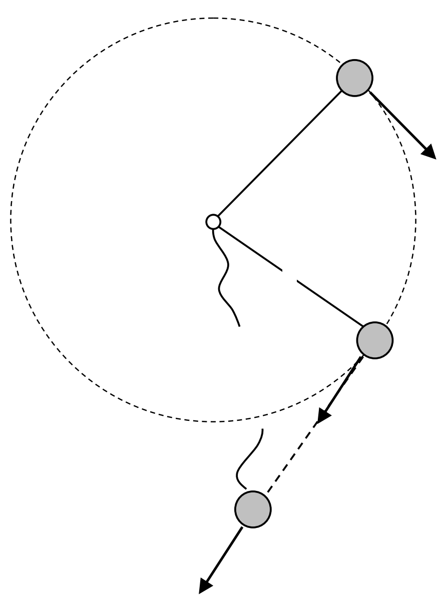


Por ejemplo:

- Para un satélite en una órbita circular alrededor de la Tierra, la fuerza centrípeta es la fuerza de la gravedad.
- La fuerza centrípeta que actúa sobre un automóvil que recorre una curva en un camino plano horizontal, es la fuerza de fricción entre las llantas y el pavimento.

En general un cuerpo puede moverse en una trayectoria circular bajo la influencia de fuerzas como por ejemplo la fricción, la fuerza gravitacional o alguna combinación de fuerzas.

Si la fuerza centrípeta que actúa sobre un objeto desaparece, el objeto ya no se moverá en su trayectoria circular; en vez de ello, lo hará a lo largo de una línea recta tangente a la circunferencia. La trayectoria tendrá la dirección de la $\vec{v}$ en el instante que la cuerda se corta. Esta idea se ilustra en la figura para el caso de una bola que da vueltas en una circunferencia en el extremo de una cuerda. Si la cuerda se rompe en un cierto instante, la bola se moverá por la trayectoria de la línea recta tangente a la circunferencia en el punto donde la cuerda se rompió.



En un **MCU** la partícula pasa por cada punto de la circunferencia a intervalos regulares de tiempo, por esto decimos que el movimiento es periódico.

El **Período** (***T***), de un cuerpo en movimiento circular uniforme es el tiempo empleado en efectuar una vuelta completa o revolución.

La **frecuencia** (***f***), es el número de revoluciones en la unidad de tiempo.

$$f = \frac{n^{o}\ revoluciones}{\Delta t}$$

Considerando que el tiempo en hacer una revolución es T, resulta:

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

Cuando el período se expresa en segundos, la frecuencia debe expresarse en s^{-1}. (segundos^{-1}), esta unidad se llama hertz (Hz) en memoria de Heinrich Hertz (1857-1894), quien demostró experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas.

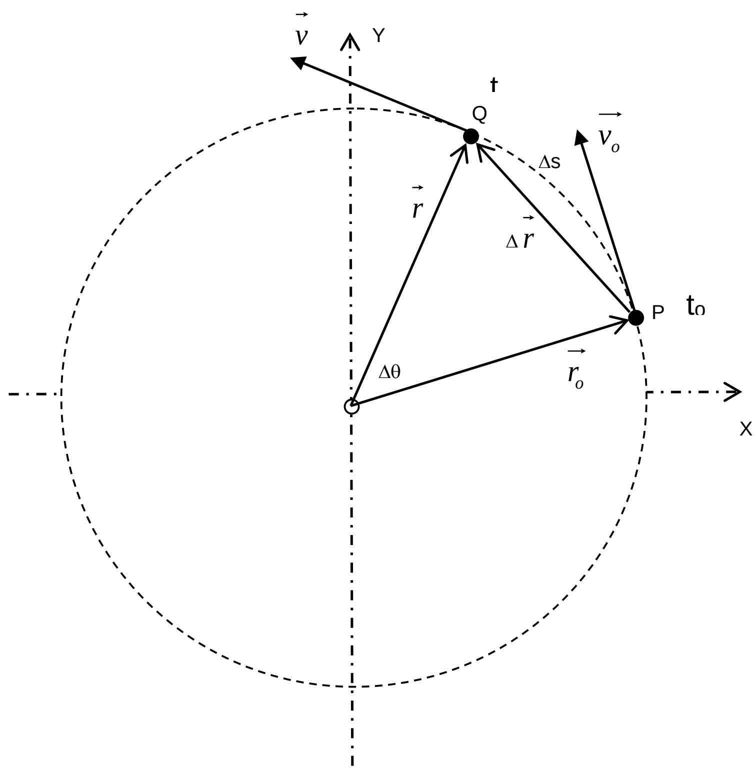
Recordemos que la aceleración en un movimiento, depende de los cambios en la velocidad. Puesto que la velocidad es una magnitud vectorial, hay dos maneras en las cuales puede producirse una aceleración: mediante un cambio en el módulo del vector y/o por medio de un cambio en su dirección. Esta última es la que ocurre cuando una partícula se mueve con movimiento circular uniforme, en el cuál la velocidad cambia de dirección en cada punto.

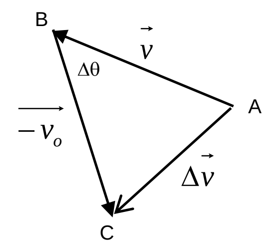
A continuación nos ocuparemos de encontrar el vector aceleración en el movimiento circular uniforme.

La figura muestra una partícula que está describiendo un movimiento circular uniforme:

- en el instante t_o se encuentra en el punto P y tiene una velocidad $\vec{v}_0$
- en algún tiempo posterior t, está en el punto Q con una velocidad $\vec{v}$.

Obsérvese que $v_0 = v$, pero $\vec{v}_0 \neq \vec{v}$.





$\vec{r}_o$: vector posición de la partícula en el instante t_o

$\vec{r}$: vector posición de la partícula en el instante t

$\vec{v}_0$: vector velocidad de la partícula en el instante t_o

$\vec{v}$: vector velocidad de la partícula en el instante t

$\Delta\vec{r}$: vector desplazamiento de la partícula en el intervalo de tiempo $\Delta t = t - t_o$

Δs : distancia recorrida por la partícula en el intervalo de tiempo Δt

Comenzaremos recordando que la aceleración media está dada por la siguiente expresión:

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

La semejanza que presentan los triángulos ABC y OPQ de las figuras anteriores, nos permite establecer la siguiente relación entre sus lados:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r}$$

Si a esta igualdad la dividimos miembro a miembro por Δt, obtenemos:

$$\frac{1}{v}\cdot\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{1}{r}\cdot\frac{\Delta r}{\Delta t} \qquad \text{o bien} \qquad \frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v}{r}\cdot\frac{\Delta r}{\Delta t}$$

Imaginemos ahora que los puntos P y Q se aproximan mucho uno hacia el otro.
En este caso $\Delta\vec{v}$, apunta hacia el centro de la trayectoria circular y debido a que la aceleración tiene la dirección y sentido de $\Delta\vec{v}$, ella también está dirigida hacia el centro.
Además a medida que P y Q se acercan entre sí, tanto como nos podamos imaginar, Δt se hace infinitamente pequeño, $\Delta r = \Delta s$ y las relaciones $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ y $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ se aproximan a los módulos de la aceleración instantánea y la velocidad instantánea respectivamente, resultando:

cuando $P \to Q$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v}{r}\cdot\frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad a_c=\frac{v^2}{r}$$

De esta forma demostramos que en el movimiento circular uniforme, el vector aceleración se dirige hacia el centro de la circunferencia y tiene un módulo dado por $\frac{v^2}{r}$ donde v es el módulo del vector velocidad de la partícula y r es el radio de la circunferencia.

Denominaremos a dicha aceleración; **aceleración radial o centrípeta.-**

MOVIMIENTO CIRCULAR NO UNIFORME

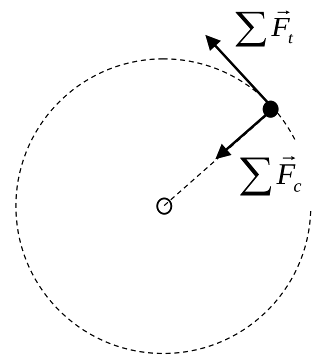
Consideremos el movimiento de una partícula a lo largo de una trayectoria circular donde el vector velocidad cambia tanto en dirección como en módulo ($v_0 \neq v$, $\vec{v}_0 \neq \vec{v}$)
En este caso en que la velocidad de la partícula cambia su dirección y varía su módulo, la aceleración resultante tiene dos componentes: una producida por la variación en la dirección de la velocidad (centrípeta) y una producida por la variación del módulo del vector velocidad (tangencial).
De la aplicación de la segunda ley de Newton surge que

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \sum \vec{F}_c + \sum \vec{F}_t$$

donde: $\sum \vec{F}_c = m\vec{a}_c \quad y \quad \sum \vec{F}_t = m\overrightarrow{a_t}$

La aceleración es $\vec{a} = \vec{a}_c + \vec{a}_t$

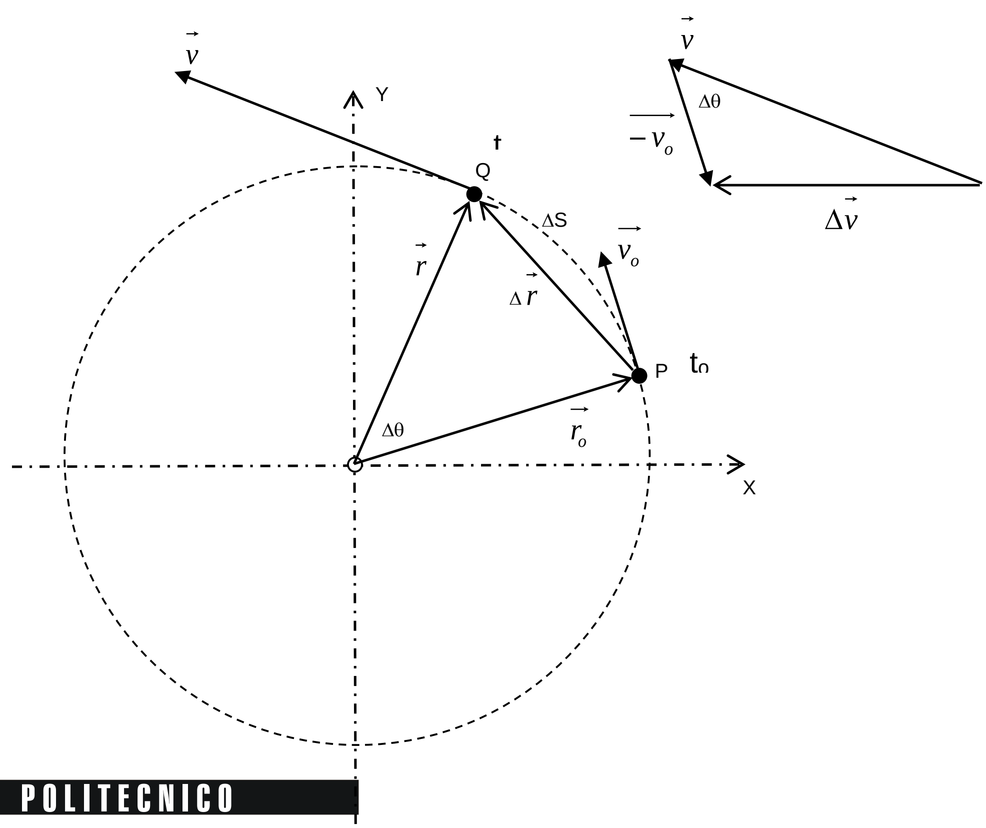
La fuerza neta ejercida sobre la partícula es: $\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_c + \sum \vec{F}_t$



El vector $\sum \vec{F}_c$ (fuerza centrípeta) está dirigido hacia el centro de la circunferencia y es responsable de la variación en la dirección de la velocidad.

El vector $\sum \vec{F}_t$ (fuerza tangencial) es tangente a la circunferencia y responsable de la variación en la rapidez.

En la figura se han representado las velocidades en dos puntos de la trayectoria: P ($\vec{v}_0$) y Q ($\vec{v}$) y el vector $\Delta\vec{v}$



El vector aceleración $\vec{a}$ puede descomponerse en dos direcciones: una radial y la otra tangencial; resulta entonces:

$$\vec{a} = \vec{a}_c + \vec{a}_t$$

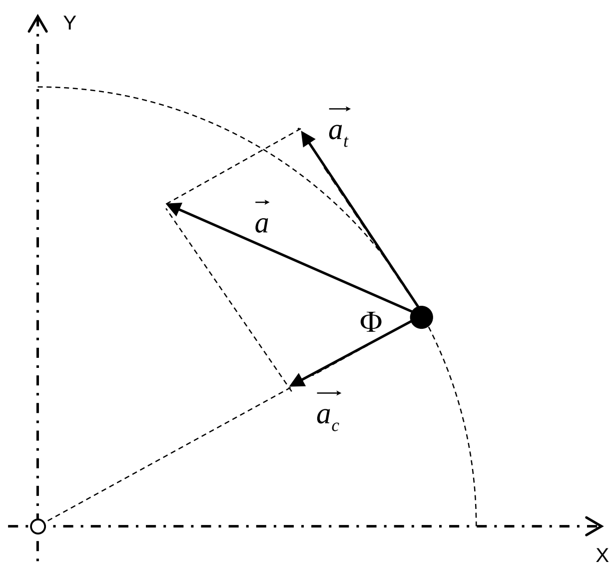
La componente de la aceleración en la dirección del radio es la **aceleración centrípeta** y la componente en la dirección de la tangente a la trayectoria es la **aceleración tangencial**

Es decir, el vector aceleración total puede escribirse como la suma vectorial de estos dos vectores componentes:

$$\boxed{\overrightarrow{a} = \overrightarrow{a_c} + \overrightarrow{a_t}}$$

Puesto que $\overrightarrow{a_c}$ y $\overrightarrow{a_t}$ son las componentes perpendiculares de $\overrightarrow{a}$, se deduce que:

$$\boxed{a = \sqrt{a_c^2 + a_t^2} \qquad y \qquad tg\Phi = \frac{a_t}{a_c}}$$

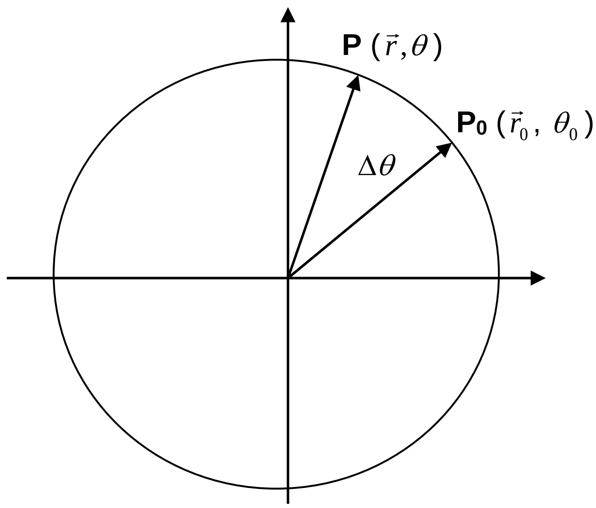


Desplazamiento, velocidad y aceleración angulares

Cuando una partícula en movimiento sigue una trayectoria circular se puede dar su posición en cada instante indicando: el radio ***r*** y el ángulo barrido ***θ***

r es el radio de la trayectoria

θ es el ángulo que forma el vector posición con el semieje x positivo



Cuando un objeto gira desde una posición inicial θ_0 hasta una posición final θ, el desplazamiento angular es

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

Podemos especificar la posición de la partícula dando sus coordenadas *x* e *y*, pero una descripción más simple y conveniente es el par ordenado ***(r, θ)*** que representa las coordenadas polares de la posición.
La simplificación proviene de que *θ* es la única coordenada que cambia con el tiempo, la otra coordenada, el radio, permanece constante, en cambio las coordenadas *x* e *y* varían ambas en cada instante y no permiten distinguir entre sí posiciones mayores a un giro completo.

Para expresar la medida del ángulo, se usan corrientemente dos unidades:

a) el grado sexagesimal (1º) definido como la amplitud angular de $\frac{1}{360}$ de un círculo completo

b) el radián (1rad) definido como la amplitud de un ángulo para el cuál el arco subtendido y el radio son iguales
La medida de un ángulo $\Delta\theta$ en radianes resulta del cociente entre la longitud del arco y el radio de la circunferencia correspondiente.

$$\boxed{\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}}$$

Un ángulo de 1 radián es aquel para el cual la medida del arco subtendido es igual al radio.

$$\Delta s = r$$

$$\Delta\theta = 1$$

Para convertir un ángulo en grados a un ángulo en radianes, o viceversa, usamos el hecho de que:

$$2\pi = 360\,^{o}$$

En el estudio del movimiento circular, todos los ángulos se indican en radianes. La posición θ queda así expresada por un número real, tal que a cada punto de la trayectoria se le asigna el par (*r*, θ) que caracteríza únivocamente a la trayectoria.

Velocidad Angular Media (ω_M): es el cociente entre el desplazamiento angular y el intervalo de tiempo en el cual se produce.

$$\boxed{\omega_M = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}}$$

La unidad de la velocidad angular se obtiene de la definición anterior:

$$[\omega_M] = \frac{[\Delta\theta]}{[\Delta t]} = \frac{rad}{s} = \frac{1}{s} = s^{-1}$$

Velocidad Angular Instantánea (ω): es el valor al cual tiende la velocidad angular media cuando el intervalo de tiempo se hace infinitamente pequeño.

$$lím_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Esta velocidad angular puede ser constante o variable.

Aceleración Angular Media (α_m): en el caso de que la velocidad angular varíe en el tiempo, definimos la aceleración angular media como la relación entre la variación de velocidad angular y el intervalo de tiempo en el cual se produce.

$$\boxed{\alpha_m = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}}$$

La unidad de la aceleración angular se obtiene de la definición anterior:

$$[\alpha_M] = \frac{[\Delta\omega]}{[\Delta t]} = \frac{rad/s}{s} = \frac{rad}{s^2} = \frac{1}{s^2} = s^{-2}$$

Aceleración Angular Instantánea (α): es el valor al cual tiende la aceleración angular media cuando el intervalo de tiempo se hace infinitamente pequeño.

$$lím_{\Delta t \to 0} \quad \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

MOVIMIENTO CIRCULAR CON ACELERACIÓN ANGULAR CONSTANTE (MCUV)

En el estudio del movimiento rectilíneo encontramos que la forma más simple de movimiento acelerado que es posible analizar es el movimiento bajo aceleración lineal constante. De igual modo, para el movimiento circular, el movimiento acelerado más simple que es posible analizar es el que ocurre bajo aceleración angular constante.

Desarrollaremos a continuación, relaciones cinemáticas para el **movimiento circular bajo aceleración angular constante.**

Si α es constante y distinta de cero, se trata de un **Movimiento Circular Uniformemente Variado.**

$$\alpha = k \wedge \alpha \neq 0 \Leftrightarrow MCUV$$

Si la aceleración angular es constante, su valor coincide con el de la aceleración angular media; por lo tanto podemos escribir:

$$\alpha = \alpha_m = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_o}{t - t_o}$$

Despejando ω; resulta:

$$\boxed{\omega = \omega_o + \alpha\,(t - t_o)}$$

esta fórmula permite calcular la velocidad angular en función del tiempo.

La velocidad angular media se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\omega_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta - \theta_o}{t - t_0}$$

Trabajando algebraicamente en forma adecuada la expresión anterior se puede escribir:

$$\omega_m = \frac{\omega_o + \omega}{2}$$

Igualando las dos expresiones anteriores y sustituyendo ω por $\omega_0 + \alpha(t - t_0)$, obtenemos:

$$\boxed{\theta = \theta_o + \omega_o (t - t_o) + \frac{1}{2}\alpha\,(t - t_o)^2}$$

Si en la fórmula anterior reemplazamos (*t–to*) por $\frac{\omega - \omega_0}{a}$ y trabajamos algebraicamente, obtenemos:

$$\boxed{\omega^2 = \omega_o^2 + 2\alpha\,(\theta - \theta_o)}$$

Esta expresión permite calcular la velocidad angular en función de la posición angular o del desplazamiento angular.

Si aceptamos como condición inicial del movimiento que $t_o = 0$, todas las ecuaciones recién vistas adoptan una forma más simplificada:

$$\boxed{\begin{array}{l} \omega = \omega_o + \alpha\, t \\ \Delta\theta = \omega_o t + \frac{1}{2}\alpha\, t^2 \\ \omega^2 = \omega_o^2 + 2\alpha\Delta\theta \end{array}}$$

Observe que estas expresiones para el movimiento circular con aceleración angular constante son de la misma forma que las correspondientes al movimiento lineal con aceleración constante con las siguientes sustituciones:

$$x \dashrightarrow \theta$$
$$v \dashrightarrow \omega$$
$$a \dashrightarrow \alpha$$

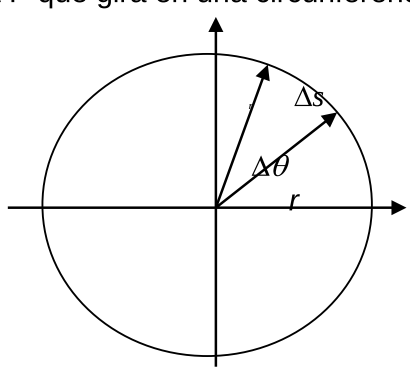
Si α **es constante e igual a cero** el movimiento recibe el nombre de **Movimiento Circular Uniforme**; las ecuaciones del movimiento circular uniformemente variado, con $\alpha = 0$, adoptan la forma:

$$\boxed{\begin{array}{l} \omega = \omega_o = constante \\ \Delta\theta = \omega t \end{array}} \quad \Leftrightarrow \quad MCU$$

RELACIONES ENTRE MAGNITUDES ANGULARES Y LINEALES

En esta sección deduciremos algunas relaciones útiles entre las variables angulares y las variables lineales que describen el movimiento circular de una partícula.

Consideremos una partícula P que gira en una circunferencia de radio r



En un tiempo t recorre el arco Δs, el ángulo central correspondiente a dicho arco es el desplazamiento angular $\Delta\theta$ que expresado en radianes es

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

Esta expresión nos permite establecer relación entre la longitud del arco y el desplazamiento angular

$$\boxed{\Delta s = r\Delta\theta}$$

De las definiciones de v y de ω resulta:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{r\Delta\theta}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = r\omega$$

Esta expresión nos permite establecer relación entre la velocidad lineal y la velocidad angular

$$\boxed{v = r\omega}$$

Igualmente resulta:

$$\boxed{a_t = r\alpha}$$

Concluimos que $\Delta s, v, a_t$ (variables lineales) se vinculan con $\Delta\theta, \omega, \alpha$ (variables angulares) a través de las expresiones sencillas siguientes:

$$\Delta s = r\Delta\theta$$
$$v = r\omega$$
$$a_t = r\alpha$$

En todos los casos las variables angulares se expresan en radianes.

Considerando la relación $v = r\omega$, la expresión para la aceleración centrípeta adopta la forma:

$$\boxed{a_c = \frac{v^2}{r} = r\omega^2}$$

Recordando que $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_c$, resulta:

$$\boxed{a = r\sqrt{\alpha^2 + \omega^4} \qquad ; \qquad \operatorname{tg}\phi = \frac{\alpha}{\omega^2}}$$

Problemas

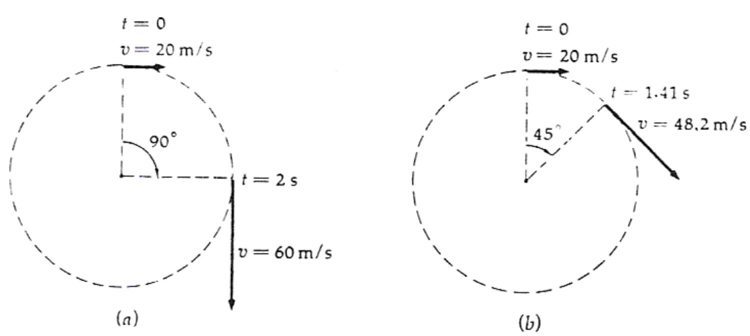
1) Una partícula recorre una trayectoria circular de radio 5 m con una velocidad cuyo módulo es constante e igual a 15 m/s. ¿Cuál es el módulo, dirección y sentido de su aceleración? R: dirección radial, sentido hacia el centro de la trayectoria, a_c = 45 m/s^2

2) Un satélite se mueve con rapidez constante en una órbita circular alrededor del centro de la Tierra y próxima a su superficie. La cantidad de aceleración es 9,8 m/s^2; ¿cuál es la rapidez y cuánto tiempo tarda en dar una revolución completa? (Radio de la Tierra: 6370 km). R: v = 7901 m/s; T = 5065 s

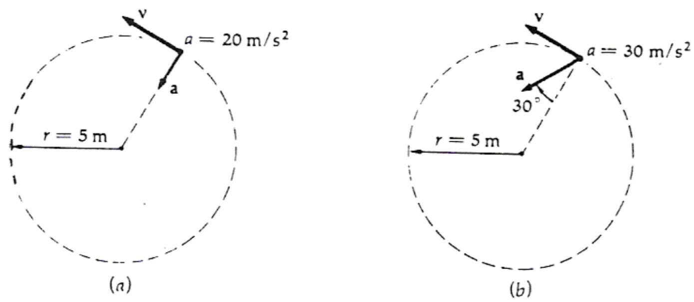
3) Un muchacho hace girar una pelota atada a una cuerda en una circunferencia horizontal de 1 m de radio. ¿A cuántas revoluciones por minuto deberá girar la pelota si su aceleración hacia el centro de la circunferencia ha de tener el mismo módulo que la aceleración de la gravedad? R: 30 rpm

4) Un piloto de avión se lanza hacia abajo para describir un rizo siguiendo un arco de circunferencia cuyo radio es 300 m. En la parte inferior de la trayectoria, donde el módulo de su velocidad es de 480 km/h, ¿cuáles son la dirección, el sentido y el módulo de su aceleración? R: radial, hacia el centro de la trayectoria, a_c = 59,26 m/s^2

5) En las partes (a) y (b) de la figura se están moviendo unas partículas en trayectorias circulares con velocidad de módulos variables, habiéndose indicado los vectores de velocidad. Halla el módulo del vector aceleración media entre las dos posiciones dadas en los dos casos.



6) En la figura unas partículas se están moviendo en sentido contrario a las agujas del reloj en una circunferencia de radio 5 m con velocidades cuyos módulos pueden ser variables. Los vectores aceleración se indican en ciertos instantes. Halla: a) Las componentes radiales y tangenciales de la aceleración en cada uno de esos instantes; b) El módulo de la velocidad en cada uno de esos instantes.



7) Una plataforma gira a 78 revoluciones por minuto y se encuentra que un pequeño objeto colocado a distancias radiales menores de 5 cm se mantiene sobre la plataforma, mienta que a valores mayores desliza respecto de la plataforma. ¿Cuál es el coeficiente de rozamiento entre la plataforma y el objeto? R: $\mu = 0{,}34$

8) Se utiliza una cuerda de 1 m de largo para colgar una esfera de 0,5 kg del punto más alto de un poste. La esfera se pone en movimiento circular alrededor del poste con una velocidad de 1,1 m/s formando la cuerda un ángulo de 20º con respecto al poste. Teniendo en cuenta que la esfera gira en un plano horizontal, calcula la tensión de la cuerda. Analiza el tipo de movimiento que describe la esfera.

9) Un automóvil describe una curva horizontal de 120 m de radio sobre una carretera sin peralte, con una velocidad de 40 km/h. ¿Cuál es el coeficiente mínimo de rozamiento entre los neumáticos y la carretera para que el automóvil no patine?; b) ¿Cuál debe ser el ángulo de peralte para esta velocidad? R: a) $\mu = 0{,}105$ b) 6º

10) Un péndulo simple se balancea en un plano vertical. Cuando la cuerda, de 0,75 m de longitud, forma un ángulo de 15º con la vertical, la esferita tiene una velocidad de 2,7 m/s. Encuentra la aceleración resultante.

11) Una rueda de 90 cm de diámetro parte del reposo y va aumentando uniformemente su velocidad angular hasta alcanzar un valor de 100 rad/s en 20 s. Calcule: a) La aceleración angular; b) El ángulo girado en ese tiempo. R: a) 5 rad/s^2 b) 10^3 rad

12) Una partícula describe una circunferencia de 5 m de radio con velocidad constante de 2 m/s. En un instante dado comienza a frenar con una aceleración constante de 0,5 m/s^2 hasta detenerse. Calcula:

a) la aceleración de la partícula antes de empezar a frenar
b) la aceleración resultante 2 s después de empezar a frenar
c) la aceleración angular mientras frena
d) el tiempo que tarda en detenerse.

13) La velocidad angular de un volante disminuye uniformemente desde 900 r.p.m. hasta 800 r.p.m. en 5 s. Calcule: a) La aceleración angular; b) El número de revoluciones efectuadas por el volante en el intervalo de 5 s; c) ¿Cuántos segundos más

serán necesarios para que el volante se detenga? R: a) -2,1 s^{-2} b) 70,83 vueltas c) 39,96 s

14) Una rueda que inicialmente se encuentra en reposo inicia un movimiento de rotación con aceleración constante igual a 1,5 rad/s^2 durante 8 s. A partir de este instante mantiene su velocidad angular constante durante 5 s más. A continuación desacelera a razón de 0,9 rad/s^2 hasta volver nuevamente al reposo. Calcule el número de revoluciones giradas por la rueda durante la totalidad del movimiento.-R: 29,92 vueltas

15) Un móvil recorre con velocidad de módulo constante una trayectoria circular de radio r. a) Si se duplica la velocidad, ¿cómo se ve afectada la aceleración?; b) Si se duplica el radio de la trayectoria, ¿cómo se ve afectada la aceleración?

16) Un objeto ejecuta un movimiento circular con una rapidez constante siempre que una fuerza neta de magnitud constante actúe perpendicular a la velocidad. ¿Qué pasa con la rapidez si la fuerza neta no es perpendicular a la velocidad?

17) Una masa *m* que está sobre una mesa horizontal lisa, está fija a una cuerda de longitud *l*, cuyo extremo a su vez está clavado sobre la mesa. La masa gira alrededor del clavo a una velocidad constante ω. Si la longitud de la cuerda se reduce a la mitad, la tensión de la cuerda no varía si la velocidad angular se cambia a:

a) $2\,\omega$ b) $\frac{\omega}{\sqrt{2}}$ c) $\sqrt{2}.\omega$ d) $\frac{\omega}{2}$

Selecciona y justifica.

18) Un chico da vueltas a una piedra de masa *m* sujeta a cuerda de longitud *l*. El plano de giro es vertical. La tensión de la cuerda cuando la piedra está en el punto más bajo de su trayectoria moviéndose con una velocidad angular ω es:
a) mg
b) $m(l\omega^2+g)$
c) $m(l\omega^2-g)$
d) ninguna de las anteriores.
Selecciona y justifica.

Bibliografía

Física, Wilson J, Buffa A, Lou B, Prentice Hall Inc., México, 2007

Física para la Ciencia y la Tecnología, Volumen 1, Tipler P, Editorial Reverté, España, 2001

Fundamentos de Física, Volumen 1, Sexta Edición, Serway R, Faughn J, International Thomson Editores, México, 2004

Física Conceptos y aplicaciones, Tippens P, Mc Graw Hill, México, 2001

Física, Blatt F, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1991

Física, Wilson J, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1996

Física, Tomo 1, Serway R, Mc Graw Hill, México, 1997

Física Principios y aplicaciones, Giancoli D, Editorial Reverté, España, 1985