CENGAGE Learning

SERWAY · JEWETT

FÍSICA

para ciencias e ingeniería

Volumen 1

Séptima edición

Física 1 - Comisión 2013-04

Clase: 19 de junio de 2025

Buenos días, hoy continuaremos con el estudio de fuerzas de rozamiento, algunos aspectos particulares de estas fuerzas, y comenzaremos el estudio de otra clase de movimiento: El *Movimiento Circular Uniforme* (MCU), de gran interés en el área técnica por la diversidad de aplicaciones en máquinas y sistemas. Se estudiará este movimiento desde la descripción de su origen y de los elementos que intervienen en el mismo.

En la segunda parte de la clase se trabajará con la guía de ejercicios N°2, en la resolución de problemas sobre los temas del día.

Se recomienda leer el Capítulo 6 desde página 137 hasta el ejemplo 6.4 inclusive (página 141) del libro *Física para Ciencias e Ingeniería,* volumen 1, de *R Serway* y *J. Jewett,* (o de cualquier otro libro de la bibliografía de la asignatura).

Está disponible en este Aula un nuevo apunte (PDF) sobre el apunte sobre MCU.

Pablo Provenzano

Los pasajeros en una montaña rusa "serpenteante" experimentan una fuerza radial hacia el centro de la pista circular y una fuerza hacia abajo debida a la gravedad. (Robin Smith/Getty Images)

6 Movimiento circular y otras aplicaciones de las leyes de Newton

En el capítulo anterior se presentaron y se aplicaron las leyes de movimiento de Newton a situaciones que suponen movimiento lineal. Ahora se analiza un movimiento que es un poco más complejo. Se aplicarán las leyes de Newton a objetos que viajan en trayectorias circulares. También se discutirá el movimiento que se observa desde un marco de referencia acelerado y el movimiento de un objeto a través de un medio viscoso. En mayor medida, este capítulo consiste en una serie de ejemplos seleccionados para ilustrar la aplicación de las leyes de Newton a varias circunstancias.

6.1 Segunda ley de Newton para una partícula en movimiento circular uniforme

En la sección 4.4 se discutió el modelo de una partícula en movimiento circular uniforme, en el que una partícula se traslada con una rapidez constante v en una trayectoria circular de radio r. La partícula experimenta una aceleración que tiene una magnitud

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

La aceleración se llama *aceleración centrípeta* porque $\vec{\mathbf{a}}_c$ se dirige hacia el centro del círculo. Además, $\vec{\mathbf{a}}_c$ *siempre* es perpendicular a $\vec{\mathbf{v}}$. (Si hubiera un componente de aceleración paralelo a $\vec{\mathbf{v}}$, la rapidez de la partícula cambiaría.)

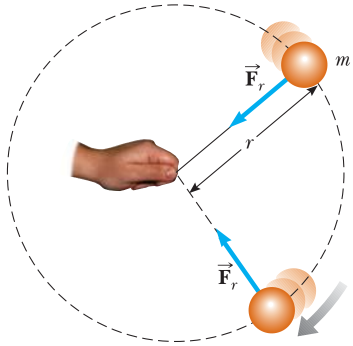


Figura 6.1 Vista superior de una bola móvil en una trayectoria circular en un plano horizontal. Una fuerza $\vec{\mathbf{F}}_r$ dirigida hacia el centro del círculo mantiene a la bola móvil en su trayectoria circular.

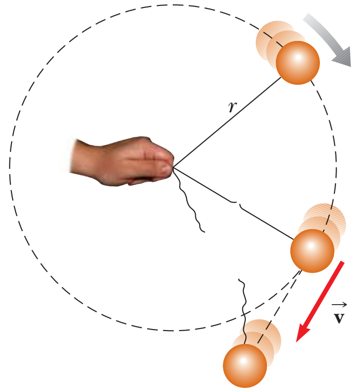


Figura 6.2 Vista superior de una bola móvil en una trayectoria circular en un plano horizontal. Cuando la cuerda se rompe, la bola se traslada en dirección tangente al círculo.

Ahora se incorpora el concepto de fuerza en la partícula en el modelo de movimiento circular uniforme. Examine una bola de masa m que se amarra a una cuerda de longitud r para hacerla girar con rapidez constante en una trayectoria circular horizontal, como se ilustra en la figura 6.1. Su peso se sostiene mediante una mesa sin fricción. ¿Por qué la bola se traslada en un círculo? De acuerdo con la primera ley de Newton, la bola se movería en una línea recta si no hubiese fuerza en ella; sin embargo, la cuerda evita el movimiento a lo largo de una línea recta al ejercer en la bola una fuerza radial $\vec{\mathbf{F}}_r$ que la hace seguir la trayectoria circular. Esta fuerza se dirige a lo largo de la cuerda hacia el centro del círculo, como se muestra en la figura 6.1.

Si se aplica la segunda ley de Newton a lo largo de la dirección radial, la fuerza neta que causa la aceleración centrípeta se relaciona con la aceleración del modo siguiente:

Fuerza que causa aceleración centrípeta ▶

$$\sum F = ma_c = m\frac{v^2}{r} \tag{6.1}$$

Una fuerza que causa una aceleración centrípeta actúa hacia el centro de la trayectoria circular y genera un cambio en la dirección del vector velocidad. Si dicha fuerza desapareciera, el objeto ya no se movería en su trayectoria circular; en vez de ello, se movería a lo largo de una trayectoria en línea recta tangente al círculo. Esta idea se ilustra en la figura 6.2 para la bola que gira al final de una cuerda en un plano horizontal. Si la cuerda se rompe en algún instante, la bola se mueve a lo largo de la trayectoria en línea recta que es tangente al círculo en la posición de la bola en ese instante.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 6.1

Dirección de viaje cuando la cuerda se corta

Estudie la figura 6.2 con atención. Muchos estudiantes (de manera errónea) piensan que la bola se moverá *radialmente*, alejándose del centro del círculo cuando la cuerda se corte. La velocidad de la bola es *tangente* al círculo. Por la primera ley de Newton, la bola continúa móvil en la misma dirección en la que se movía justo cuando desaparece la fuerza de la cuerda.

Pregunta rápida 6.1 Usted viaja en una rueda de la fortuna que gira con rapidez constante. La cabina en la que viaja siempre mantiene su orientación correcta hacia arriba; no se invierte. **i)** ¿Cuál es la dirección de la fuerza normal sobre usted desde el asiento cuando está en lo alto de la rueda? a) hacia arriba, b) hacia abajo, c) imposible de determinar. **ii)** De las mismas opciones, ¿cuál es la dirección de la fuerza neta sobre usted cuando está en lo alto de la rueda?

EJEMPLO 6.1 El péndulo cónico

Una pequeña bola de masa m se suspende de una cuerda de longitud L. La bola da vueltas con rapidez constante v en un círculo horizontal de radio r, como se muestra en la figura 6.3. (Puesto que la cuerda hace un recorrido de la superficie en forma de cono, el sistema se conoce como *péndulo cónico*.) Encuentre una expresión para v.

SOLUCIÓN

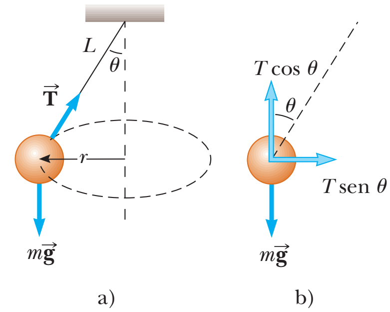


Figura 6.3 (Ejemplo 6.1) a) Péndulo cónico. La trayectoria del objeto es un círculo horizontal. b) Diagrama de cuerpo libre para el objeto.

Conceptualizar Examine el movimiento de la bola en la figura 6.3a y observe que la cuerda hace un recorrido en cono y que la bola se mueve en círculo.

Categorizar La bola en la figura 6.3 no tiene aceleración vertical. Debido a eso, se le modela como una partícula en equilibrio respecto de la dirección vertical. Experimenta una aceleración centrípeta en la dirección horizontal, de modo que se le modela como una partícula en movimiento circular uniforme en esta dirección.

Analizar Sea θ la representación del ángulo entre la cuerda y la vertical. En el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 6.3b, la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ que ejerce la cuerda se resuelve en una componente vertical $T\cos\theta$ y una componente horizontal $T\operatorname{sen}\theta$ que actúa hacia el centro de la trayectoria circular.

Aplique el modelo de partícula en equilibrio en la dirección vertical:

$$\sum F_y = T\cos\theta - mg = 0$$

$$1)\quad T\cos\theta = mg$$

Use la ecuación 6.1 para expresar la fuerza que proporciona la aceleración centrípeta en la dirección horizontal:

$$2)\quad \sum F_x = T\operatorname{sen}\theta = ma_c = \frac{mv^2}{r}$$

Divida la ecuación 2) entre la ecuación 1) y use $\operatorname{sen}\theta/\cos\theta = \tan\theta$:

$$\tan\theta = \frac{v^2}{rg}$$

Resuelva para v:

$$v = \sqrt{rg\tan\theta}$$

Incorpore $r = L\operatorname{sen}\theta$ a partir de la geometría a la figura 6.3a:

$$v = \boxed{\sqrt{Lg\operatorname{sen}\theta\tan\theta}}$$

Finalizar Note que la rapidez es independiente de la masa de la bola. Considere lo que ocurre cuando θ va a 90° de modo que la cuerda es horizontal. Puesto que la tangente de 90° es infinita, la rapidez v es infinita, lo que dice que la cuerda posiblemente no es horizontal. Si lo fuese, no habría componente vertical de la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ para equilibrar la fuerza gravitacional en la bola. Por esta razón se mencionó en la figura 6.1 que el peso de la bola se sostiene mediante una mesa sin fricción.

EJEMPLO 6.2 ¿Qué tan rápido puede girar?

Una bola de 0.500 kg de masa se une al extremo de una cuerda de 1.50 m de largo. La bola da vueltas en un círculo horizontal como se muestra en la figura 6.1. Si la cuerda resiste una tensión máxima de 50.0 N, ¿cuál es la máxima rapidez a la que gira la bola antes de que se rompa la cuerda? Suponga que la cuerda permanece horizontal durante el movimiento.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Tiene sentido que, mientras más fuerte sea la cuerda, más rápido gira la bola antes de que la cuerda se rompa. Además, se espera que una bola con mayor masa rompa la cuerda a una rapidez más baja. (¡Imagine girar una bola de boliche en la cuerda!)

Categorizar Puesto que la bola se mueve en una trayectoria circular, se le modela como una partícula en movimiento circular uniforme.

Analizar Incorpore la tensión y la aceleración centrípeta en la segunda ley de Newton:

$$T = m\frac{v^2}{r}$$

Resuelva para v:

$$1)\quad v = \sqrt{\frac{Tr}{m}}$$

Encuentre la rapidez máxima que puede tener la bola, que corresponde a la tensión máxima que la cuerda resiste:

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{T_{\text{máx}} r}{m}} = \sqrt{\frac{(50.0\text{ N})(1.50\text{ m})}{0.500\text{ kg}}} = \boxed{12.2\text{ m/s}}$$

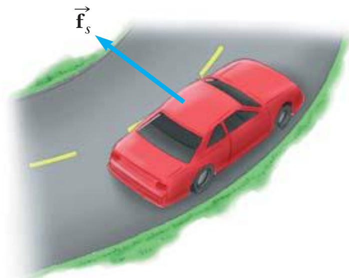
Finalizar La ecuación 1) muestra que v aumenta con T y disminuye con m más grande, como se espera de la conceptualización del problema.

¿Qué pasaría si? Suponga que la bola gira en un círculo de mayor radio a la misma rapidez v. ¿Es más o menos probable que la cuerda se rompa?

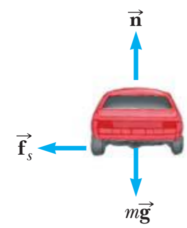
Respuesta El radio más grande significa que el cambio en la dirección del vector velocidad será más pequeño en un intervalo de tiempo dado. Por ende, la aceleración es más pequeña y la tensión requerida en la cuerda es más pequeña. Como resultado, es menos probable que la cuerda se rompa cuando la bola viaja en un círculo de radio más grande.

EJEMPLO 6.3 ¿Cuál es la máxima rapidez del automóvil?

Un automóvil de 1 500 kg, se traslada sobre una curva, plana horizontal como se muestra en la figura 6.4a. Si el radio de la curva es 35.0 m y el coeficiente de fricción estática entre las llantas y el pavimento seco es 0.523, encuentre la rapidez máxima que alcanza el automóvil y aún así da la vuelta exitosamente.



a)



b)

Figura 6.4 (Ejemplo 6.3) a) La fuerza de fricción estática dirigida hacia el centro de la curva mantiene al automóvil en movimiento en una trayectoria circular. b) Diagrama de cuerpo libre para el automóvil.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Considere que la autopista curva es parte de un gran círculo, de modo que el automóvil se traslada en una trayectoria circular.

Categorizar Respecto a la etapa conceptualizar del problema, el automóvil se modela como una partícula en movimiento circular uniforme en la dirección horizontal. El automóvil no acelera verticalmente, de modo que se modela como una partícula en equilibrio en la dirección vertical.

Analizar La fuerza que le permite al automóvil permanecer en su trayectoria circular es la fuerza de fricción estática. (Es *estática* porque no ocurre deslizamiento en el punto de contacto entre camino y llantas. Si esta fuerza de fricción estática fuese cero —por ejemplo, si el automóvil estuviese sobre un camino congelado— el automóvil continuaría en una línea recta y se deslizaría hasta salir del camino.) La rapidez máxima $v_{\text{máx}}$ que puede tener el automóvil alrededor de la curva es la rapidez a la que está a punto de derrapar hacia afuera. En este punto, la fuerza de fricción tiene su valor máximo $f_{s,\text{ máx}} = \mu_s n$.

Aplique la ecuación 6.1 en la dirección radial para la condición de rapidez máxima:

$$1)\quad f_{s,\text{máx}} = \mu_s n = m\frac{v_{\text{máx}}^2}{r}$$

Aplique el modelo de partícula en equilibrio al automóvil en la dirección vertical:

$$\sum F_y = 0 \quad\rightarrow\quad n - mg = 0 \quad\rightarrow\quad n = mg$$

Resuelva la ecuación 1) para la rapidez máxima y sustituya para n:

$$2)\quad v_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{\mu_s n r}{m}} = \sqrt{\frac{\mu_s m g r}{m}} = \sqrt{\mu_s g r}$$

$$= \sqrt{(0.523)(9.80\text{ m/s}^2)(35.0\text{ m})} = \boxed{13.4\text{ m/s}}$$

Finalizar Esta rapidez es equivalente a 30.0 mi/h. Por lo tanto, este camino podría beneficiarse enormemente de cierto peralte, ¡como en el ejemplo siguiente! Advierta que la rapidez máxima no depende de la masa del automóvil, razón por la cual las autopistas curvas no requieren múltiples límites de rapidez para cubrir las varias masas de los vehículos que usan el camino.

¿Qué pasaría si? Suponga que un automóvil viaja por esta curva en un día húmedo y comienza a derrapar en la curva cuando su rapidez llega sólo a 8.00 m/s. ¿Qué se puede decir acerca del coeficiente de fricción estática en este caso?

Respuesta El coeficiente de fricción estática entre las llantas y el camino húmedo debe ser menor que el existente entre las llantas y un camino seco. Esta expectativa concuerda con la experiencia de conducir, porque un derrape es más probable en un camino húmedo que en un camino seco.

Para comprobar la sospecha, se puede resolver la ecuación (2) para el coeficiente de fricción estática:

$$\mu_s = \frac{v_{\text{máx}}^2}{gr}$$

Al sustituir los valores numéricos se obtiene

$$\mu_s = \frac{v_{\text{máx}}^2}{gr} = \frac{(8.00 \text{ m/s})^2}{(9.80 \text{ m/s}^2)(35.0 \text{ m})} = 0.187$$

que de hecho es más pequeño que el coeficiente de 0.523 para el camino seco.

EJEMPLO 6.4 La autopista peraltada

Un ingeniero civil quiere rediseñar la curva de la autopista del ejemplo 6.3 en tal forma que un automóvil no tenga que depender de la fricción para circular la curva sin derrapar. En otras palabras, un automóvil que se traslada a la rapidez diseñada puede superar la curva incluso cuando el camino esté cubierto con hielo. Dicha rampa será *peraltada*, lo que significa que la carretera está inclinada hacia el interior de la curva. Suponga que la rapidez diseñada para la rampa es 13.4 m/s (30.0 mi/h) y el radio de la curva es 35.0 m. ¿Cuál es el ángulo de peralte?

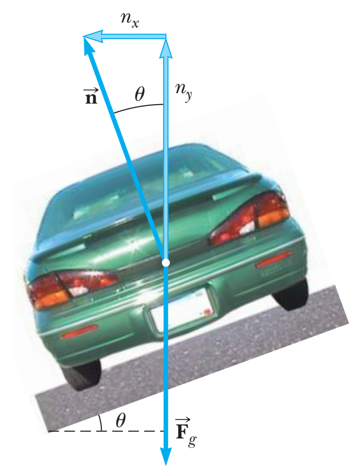


Figura 6.5 (Ejemplo 6.4) Un automóvil que recorre una curva sobre un camino peraltado a un ángulo θ con la horizontal. Cuando la fricción es despreciable, la fuerza que causa la aceleración centrípeta y mantiene al automóvil en movimiento en su trayectoria circular es la componente horizontal de la fuerza normal.

SOLUCIÓN

Conceptualizar La diferencia entre este ejemplo y el ejemplo 6.3 es que el automóvil ya no se mueve en una carretera plana. La figura 6.5 muestra la carretera peraltada, con el centro de la trayectoria circular del automóvil lejos hacia la izquierda de la figura. Observe que el componente horizontal de la fuerza normal participa en la generación de la aceleración centrípeta del automóvil.

Categorizar Como en el ejemplo 6.3, el automóvil se modela como una partícula en equilibrio en la dirección vertical y una partícula en movimiento circular uniforme en la dirección horizontal.

Analizar En un camino a nivel (sin peralte), la fuerza que causa la aceleración centrípeta es la fuerza de fricción estática entre el automóvil y el camino, como se vio en el ejemplo precedente. Sin embargo, si el camino está peraltado en un ángulo θ, como en la figura 6.5, la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ tiene una componente horizontal hacia el centro de la curva. Puesto que la rampa se diseña de modo que la fuerza de fricción estática sea cero, sólo la componente $n_x = n \operatorname{sen} \theta$ causa la aceleración centrípeta.

Escriba la segunda ley de Newton para el automóvil en la dirección radial, que es la dirección x:

$$1) \quad \sum F_r = n \operatorname{sen} \theta = \frac{mv^2}{r}$$

Aplique el modelo de partícula en equilibrio al automóvil en la dirección vertical:

$$\sum F_y = n \cos \theta - mg = 0$$

$$2) \quad n \cos \theta = mg$$

Divida la ecuación 1) entre la ecuación 2):

$$3) \quad \tan \theta = \frac{v^2}{rg}$$

Resuelva para el ángulo θ:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{(13.4 \text{ m/s})^2}{(35.0 \text{ m})(9.80 \text{ m/s}^2)}\right) = \boxed{27.6°}$$

Finalizar La ecuación 3) muestra que el ángulo de peralte es independiente de la masa del vehículo que entra a la curva. Si un automóvil recorre la curva con una rapidez menor que 13.4 m/s, se necesita fricción para evitar que se deslice por el peralte (hacia la izquierda en la figura 6.5). Un conductor que intente superar la curva a una rapidez mayor que 13.4 m/s tiene que depender de la fricción para evitar que derrape afuera del peralte (hacia la derecha en la figura 6.5).

Nueva edición de la ya conocida obra de Raymond A. Serway y John W. Jewett Jr. Esta séptima edición, además de conservar la gran capacidad didáctica que la ha caracterizado, cuenta con el soporte de herramientas tecnológicas que proveen de más apoyo al usuario durante el desarrollo del curso.

Características

- En el capítulo 2 permanece la sección sobre la estrategia para resolver problemas.
- A lo largo de los capítulos 3 a 5 se utiliza explícitamente dicha estrategia, para que el alumno aprenda a emplearla.
- Los capítulos 7 y 8 se reorganizaron completamente para preparar al estudiante para el planteamiento de energía que se hace a través del libro.
- Una nueva sección en el capítulo 9 enseña al estudiante cómo analizar sistemas deformables con la ecuación de la conservación de la energía y el teorema de impulso-momentum.
- Aproximadamente el 23% de los problemas son nuevos.
- Se mantiene la sección *¿Qué pasaría si?* en los ejemplos resueltos, para ofrecer una variación al ejemplo que estimule la capacidad de razonamiento del estudiante.

Estas características, entre muchas otras que descubrirá al interior del texto, aunadas al lenguaje claro y accesible con el que desarrolla los temas, lo harán sin duda alguna, su libro de física favorito; tanto si usted es docente como si es estudiante de alguna licenciatura en el área de ingeniería o ciencias.

ISBN-13: 978-607481357-9
ISBN-10: 607481357-4
9 786074 813579

CENGAGE Learning™

http://latinoamerica.cengage.com