

Movimiento circular

Carlos Enrique Hernández Anguiano

Rafael Augusto Vázquez Reveles

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior SN, Ciudad de México, México, C.P. 04510.

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar experimentalmente la relación entre el movimiento circular, el radio de giro y la aceleración centrípeta. Para ello se empleó el Equipo de Pruebas de Fuerza Centrípeta Vernier junto con el sensor Vernier Go Direct de Fuerza y Aceleración, fijado al brazo giratorio del sistema. Se realizaron mediciones en distintas configuraciones de radio y se registraron series de 101 datos de aceleración, además de valores de velocidad angular obtenidos mediante el giroscopio integrado. Los datos fueron analizados mediante ajustes lineales con el propósito de evaluar la estabilidad temporal de las magnitudes medidas y la dependencia de la aceleración centrípeta respecto al radio. Para $R = 0.15$ m, la aceleración se mantuvo cercana a 9.76 m s^{-2} , con una pendiente compatible con cero. La velocidad angular permaneció alrededor de 8.0 rad s^{-1} , mientras que el ajuste de aceleración centrípeta contra radio produjo una pendiente de 63.42 s^{-2} y un intercepto de 0.37 m s^{-2} . Estos resultados confirmaron una relación aproximadamente lineal entre aceleración centrípeta y radio, consistente con el modelo de movimiento circular uniforme cuando la velocidad angular se mantiene casi constante.

Palabras clave: movimiento circular; aceleración centrípeta; radio de giro; velocidad angular; sensor Vernier Go Direct.

Introducción

El movimiento circular se define como el desplazamiento de un cuerpo cuya trayectoria describe una circunferencia alrededor de un punto o eje fijo. Sus características fundamentales dependen de la relación entre la posición angular, el tiempo y el radio de la trayectoria. Entre los conceptos principales se encuentran la velocidad angular, que mide la rapidez con que cambia el ángulo recorrido; la velocidad lineal, asociada al desplazamiento sobre la circunferencia; la aceleración centrípeta, dirigida hacia el centro y responsable del cambio continuo en la dirección de la velocidad; el período, entendido como el tiempo necesario para completar una vuelta; y la frecuencia, que expresa el número de revoluciones por unidad de tiempo.

El estudio del movimiento circular ha ocupado un lugar central en la historia de la física. Desde las observaciones astronómicas antiguas sobre los movimientos planetarios, el fenómeno adquirió una formulación matemática más precisa. En el siglo XVII, Christiaan Huygens analizó el movimiento circular uniforme y estableció relaciones esenciales entre fuerza centrípeta, velocidad y radio. Posteriormente, Isaac Newton integró estas ideas en la

mecánica clásica mediante sus leyes del movimiento y la gravitación universal, lo que permitió comprender el movimiento orbital como una manifestación de la dinámica circular.

La relación entre movimiento circular y radio resulta relevante porque el radio determina directamente magnitudes como la velocidad lineal y la aceleración centrípeta. Esta dependencia es fundamental en sistemas tecnológicos y científicos actuales, como satélites artificiales, centrifugadoras, turbinas, ruedas, motores eléctricos y aceleradores de partículas, en los que controlar el radio permite modificar la estabilidad, la rapidez y las fuerzas involucradas en el movimiento.

El Equipo de Pruebas de Fuerza Centrípeta Vernier es un sistema didáctico-instrumental diseñado para analizar cuantitativamente el movimiento circular mediante la medición de la fuerza radial que mantiene una masa en trayectoria curva. Su configuración integra una base o bastidor, eje y ensamble giratorio con polea escalonada, viga rotatoria, carro deslizante para masas de prueba, carro de contrapeso, masas calibradas, soportes de nivelación y elementos de acoplamiento para sensores de fuerza, fotocompuertas o el sensor Go Direct de Fuerza y Aceleración, con el que pueden registrarse fuerza, aceleración y velocidad angular.

El estudio de la fuerza centrípeta se consolidó históricamente a partir de la formulación newtoniana de la dinámica y de la comprensión de que, aun con rapidez constante, el movimiento circular uniforme implica una aceleración dirigida hacia el centro. Por la segunda ley de Newton, dicha aceleración exige una fuerza neta radial, expresada como: [1]

$$F_c = m \frac{v^2}{r} = m r \omega^2 \quad (1)$$

El sensor Vernier Go Direct de Fuerza y Aceleración es un instrumento digital diseñado para medir interacciones mecánicas y variables de movimiento en actividades experimentales de física. Integra un sensor de fuerza, un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes, lo que permite registrar simultáneamente fuerzas aplicadas, aceleraciones lineales y movimiento rotacional. Su funcionamiento se basa en la conversión de magnitudes mecánicas en señales eléctricas que son procesadas digitalmente y transmitidas a una computadora, tableta o dispositivo móvil mediante conexión USB o Bluetooth. Esta integración facilita la obtención de datos en tiempo real y su representación gráfica inmediata mediante software de adquisición y análisis. [2]

El objetivo general de este trabajo fue estudiar las características del movimiento circular

Para ello nos apoyamos en los objetivos particulares:

- Medir la velocidad angular en el movimiento.
- Medir la aceleración en dirección radial al centro de la trayectoria.
- Determinar la relación entre aceleración en dirección radial y la longitud del radio.

Metodología

Se montó un sistema experimental con el Equipo de Pruebas de Fuerza Centrípeta Vernier y el sensor Vernier Go Direct de Fuerza y Aceleración, el cual fue fijado al brazo giratorio del dispositivo. Se realizó una medición compuesta por 101 datos en distintas configuraciones experimentales, modificando el radio de giro en el que se encontraba ubicado el acelerómetro. Las distancias empleadas se determinaron a partir de las marcas incluidas en el brazo del equipo, con valores de 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0 y 15.0 cm, todas con una incertidumbre instrumental de ± 0.1 cm.

En cada configuración se registraron los valores de aceleración proporcionados por el acelerómetro del sensor. Esta medición permitió estudiar la dependencia de la aceleración centrípeta con respecto al radio de giro, considerando que, para un movimiento circular, dicha aceleración se relaciona con el radio mediante la ecuación (2) cuando la velocidad angular se mantiene aproximadamente constante:

$$a_c = \omega^2 R \quad (2)$$

En este contexto, el sensor Go Direct de Fuerza y Aceleración resultó adecuado para el registro experimental, debido a que integra un acelerómetro triaxial y permite obtener datos digitales en tiempo real durante el movimiento del sistema. [2]

Resultados y Análisis

Con los 101 datos registrados para cada configuración, se consideró que, debido a que estos valores debían permanecer aproximadamente constantes durante el intervalo de medición, era más adecuado realizar ajustes lineales en lugar de calcular únicamente promedios. En este análisis, se esperaba obtener una recta con pendiente cercana a cero, lo cual indicaría que la aceleración registrada por el sensor se mantuvo estable durante la toma de datos.

La elección de un ajuste lineal permitió evaluar no solo el valor representativo de la aceleración en cada configuración, sino también la posible presencia de variaciones sistemáticas a lo largo del tiempo. De este modo, una pendiente significativamente distinta de cero podría interpretarse como evidencia de fluctuaciones en el movimiento, cambios en la velocidad angular, vibraciones del sistema o errores asociados al montaje experimental. Por el contrario, una pendiente compatible con cero respaldaría la hipótesis de que la aceleración se mantuvo aproximadamente constante durante cada intervalo de medición.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de cómo se realizaron estos ajustes.

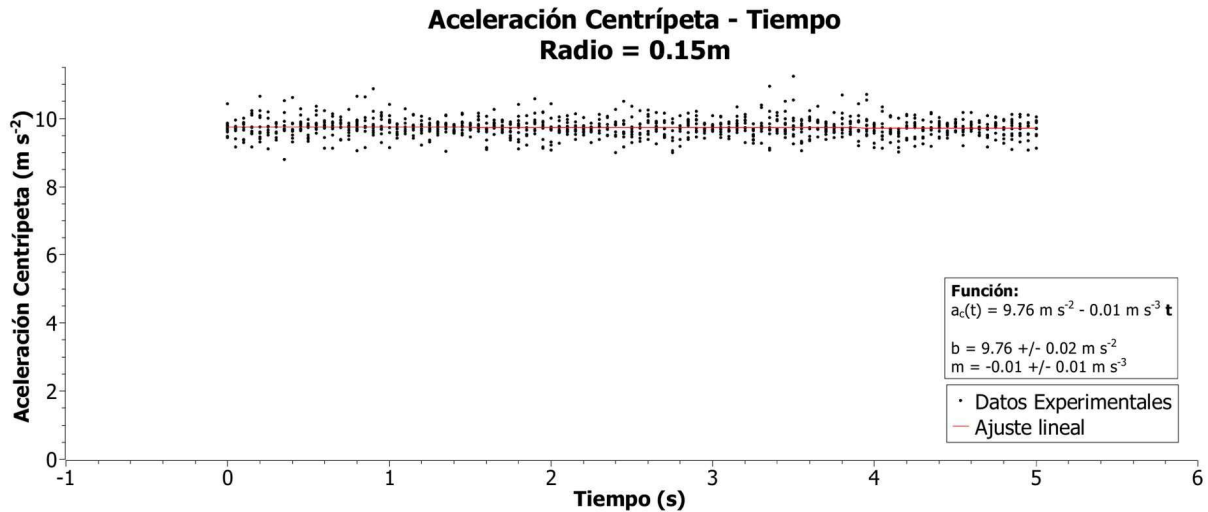


Figura 1. Aceleración centrípeta en función del tiempo para $R = 0.15$ m. En el eje horizontal se representa el tiempo, t , en segundos, con una escala aproximada de -1 a 6 s, aunque los datos experimentales se concentran entre 0 y 5 s. En el eje vertical se representa la aceleración centrípeta, a_c , en m s^{-2} , con valores visibles entre 0 y aproximadamente 12 m s^{-2} . Los puntos negros corresponden a los datos experimentales, mientras que la línea roja representa el ajuste lineal.

La función ajustada indicada en la gráfica fue:

$$a_c(t) = 9.76 \text{ m s}^{-2} - 0.01 \text{ m s}^{-3} t \quad (3)$$

El ajuste presentó un intercepto $b = 9.76 \pm 0.02 \text{ m s}^{-2}$ y una pendiente $m = -0.01 \pm 0.01 \text{ m s}^{-3}$.

Los datos mostraron una aceleración centrípeta prácticamente constante durante el intervalo de medición. La pendiente negativa fue muy pequeña y compatible con cero dentro de la incertidumbre experimental, lo cual indicó que no hubo una variación sistemática apreciable de a_c con el tiempo. La dispersión de los puntos alrededor del ajuste lineal fue moderada, pero no modificó la tendencia general: la aceleración permaneció cercana a 9.76 m s^{-2} .

Este comportamiento es consistente con un régimen de movimiento circular aproximadamente uniforme, en el que, para un radio fijo, la aceleración centrípeta depende principalmente de la velocidad angular, como se muestra en la ecuación (2).

Repetiendo el proceso descrito anteriormente, se graficaron distintos puntos experimentales con el propósito de estudiar la dependencia de la velocidad angular registrada por el sensor respecto al radio. Para este análisis, la velocidad angular se asoció al canal de medición del giroscopio integrado en el sensor Vernier Go Direct de Fuerza y Aceleración, ya que esta magnitud describe la rapidez con la que cambia la posición angular del sistema durante el movimiento circular.

La representación gráfica de la velocidad angular en función del radio permitió evaluar si el movimiento se mantuvo aproximadamente uniforme durante cada intervalo de medición. En particular, una tendencia horizontal o una pendiente cercana a cero indicaría que la velocidad angular permaneció casi constante, mientras que variaciones apreciables podrían asociarse

con fluctuaciones en el montaje, cambios en la rapidez de rotación o perturbaciones mecánicas durante la toma de datos.

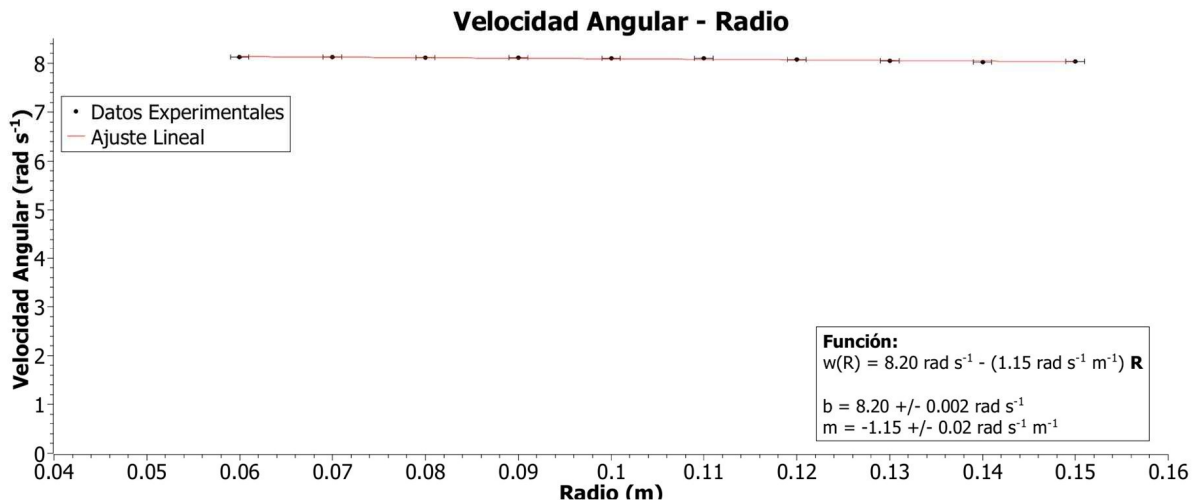


Figura 2. Velocidad angular en función del radio. En el eje horizontal se representó el radio, R , expresado en metros (m), mientras que en el eje vertical se representó la velocidad angular, ω , expresada en radianes por segundo (rad s^{-1}). Los puntos experimentales describieron la variación de ω respecto al radio, y el ajuste lineal permitió evaluar si existió una variación sistemática de la rapidez angular durante la medición. La función ajustada mostrada en la gráfica fue:

$$\omega(R) = 8.20 \text{ rad s}^{-1} - (1.15 \text{ rad s}^{-1} \text{ m}^{-1}) R \quad (4)$$

El ajuste presentó un intercepto $b = 8.20 \pm 0.002 \text{ rad s}^{-1}$ y una pendiente $m = -1.15 \pm 0.02 \text{ rad s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

La gráfica de velocidad angular indicó que el sistema mantuvo una rotación aproximadamente uniforme. Si los datos se distribuyeron alrededor de un valor cercano a 8.0 rad s^{-1} , entonces la velocidad angular permaneció prácticamente constante durante la medición. Este comportamiento es coherente con los resultados de la primera gráfica, donde la aceleración centrípeta para $R = 0.15 \text{ m}$ no presentó una variación significativa con el tiempo.

La constancia de ω es especialmente importante porque permite interpretar correctamente la relación lineal observada entre aceleración centrípeta y radio. En efecto, la ecuación (2) predice una dependencia lineal entre a_c y R únicamente cuando ω se mantiene aproximadamente constante. Así, la Figura 2 funciona como una verificación experimental de esa condición.

Se graficaron los datos obtenidos de aceleración centrípeta en función del radio. Los resultados mostraron una dependencia aproximadamente lineal, por lo que se decidió realizar un ajuste lineal para describir el comportamiento experimental de las variables.

Esta elección se justificó a partir de la ecuación (2), la cual establece que, si la velocidad angular se mantiene aproximadamente constante, la aceleración centrípeta debe ser directamente proporcional al radio. En este sentido, la pendiente del ajuste lineal puede asociarse con el valor de ω^2 , mientras que la ordenada al origen permite identificar posibles desviaciones experimentales, errores sistemáticos o contribuciones no consideradas en el modelo ideal.

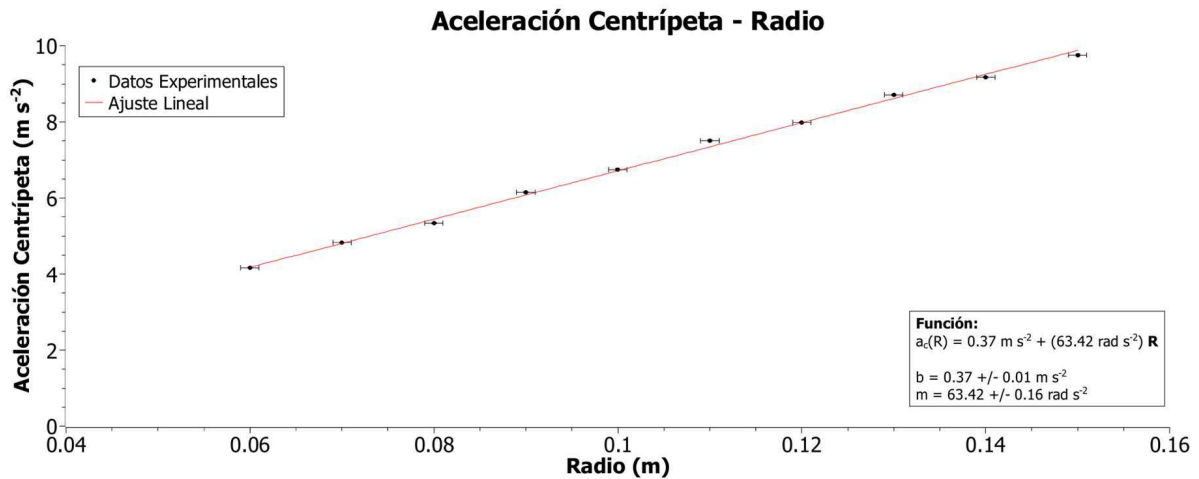


Figura 3. Aceleración centrípeta en función del radio. En el eje horizontal se representa el radio, R , en metros, con una escala aproximada de 0.04 a 0.16 m. En el eje vertical se representa la aceleración centrípeta, a_c , en $m s^{-2}$, con valores entre 0 y 10 $m s^{-2}$. Los puntos negros corresponden a los datos experimentales y la línea roja al ajuste lineal.

La función reportada en la gráfica fue:

$$a_c(R) = 0.37 m s^{-2} + (63.42 s^{-2}) R \quad (5)$$

El ajuste presentó un intercepto $b = 0.37 \pm 0.01 m s^{-2}$ y una pendiente $m = 63.42 \pm 0.16 s^{-2}$.

Los datos mostraron una relación lineal creciente entre la aceleración centrípeta y el radio. A medida que el radio aumentó desde aproximadamente 0.06 m hasta 0.15 m, la aceleración centrípeta aumentó de cerca de 4.2 $m s^{-2}$ a aproximadamente 9.8 $m s^{-2}$. La tendencia observada fue consistente con la ecuación (2), siempre que la velocidad angular ω se mantenga aproximadamente constante.

La pendiente del ajuste, $m = 63.42 s^{-2}$, puede interpretarse como una estimación de ω^2 . Por tanto:

$$\omega = \sqrt{63.42 s^{-2}} \approx 7.96 rad s^{-1} \quad (6)$$

lo que equivale a una frecuencia aproximada de:

$$f = \omega / 2\pi \approx 1.27 Hz \quad (7)$$

El intercepto positivo, $b = 0.37 m s^{-2}$, indica que el ajuste no pasa exactamente por el origen, como predeciría el modelo ideal. Esto puede deberse a errores sistemáticos, calibración imperfecta del sensor, incertidumbre en la medición del radio, aceleraciones residuales o a que la velocidad angular no fue exactamente constante para todos los radios.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron estudiar experimentalmente la relación entre el radio de giro y la aceleración centrípeta en un sistema de movimiento circular medido con el Equipo de Pruebas de Fuerza Centrípeta Vernier y el sensor Vernier Go Direct de Fuerza y Aceleración. El análisis de la aceleración en función del tiempo mostró que, para $R = 0.15$ m, la aceleración centrípeta permaneció cercana a 9.76 m s^{-2} , con una pendiente compatible con cero dentro de la incertidumbre experimental. Esto indicó que el sistema mantuvo una condición de movimiento aproximadamente uniforme durante el intervalo de medición.

La medición de la velocidad angular mostró valores cercanos a 8.0 rad s^{-1} , lo cual respaldó la hipótesis de que ω se mantuvo casi constante durante el experimento. Bajo esta condición, la relación entre aceleración centrípeta y radio presentó una tendencia lineal creciente, de acuerdo con la ecuación (2). La pendiente del ajuste, $m = 63.42 \text{ s}^{-2}$, permitió estimar una velocidad angular de 7.96 rad s^{-1} y una frecuencia aproximada de 1.27 Hz . El intercepto positivo de 0.37 m s^{-2} sugiere la presencia de desviaciones experimentales asociadas a errores sistemáticos, calibración del sensor, incertidumbre en el radio o pequeñas variaciones de la velocidad angular.

En conjunto, el experimento confirmó que la aceleración centrípeta aumenta de manera aproximadamente proporcional al radio cuando la velocidad angular se mantiene casi constante. Como líneas de trabajo futuro, sería conveniente mejorar el control de la velocidad angular, realizar una calibración más precisa del sensor, ampliar el intervalo de radios analizados y comparar los resultados con mediciones independientes de frecuencia o período de rotación.

Bibliografía

[1] R. A. Serway y J. W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería, volumen 1, 9.^a edición, Cengage Learning, México, páginas sobre leyes de Newton.

[2] Vernier Go Y Vernier aparato de fuerza

[3] Datos obtenidos:

<https://drive.google.com/drive/folders/1Jjh3wiSgwn9ptZ33FdKz3OnNKRbl0qVF?usp=sharing>