



## El péndulo: un clásico que no pasa de moda

Ricardo Pérez

### **Todo empezó en Pisa**

Galileo utilizó el péndulo para estudiar la caída libre de los cuerpos y posteriormente otros científicos notables lo utilizaron en sus investigaciones. Por ejemplo Newton lo empleó en diversos experimentos para: determinar la constante de la gravedad de la Tierra,  $g$ ; demostrar la inexistencia del éter propuesto por Aristóteles; mostrar la relación entre el peso y la masa, estudiar las colisiones entre objetos y determinar la velocidad del sonido, entre otras cosas. Además, el descubrimiento y estudio del péndulo tuvo repercusiones tecnológicas. Como ejemplo podemos mencionar que el desarrollo del reloj mejoró la navegación marítima y por ende aumentó el comercio global, tampoco se puede pasar por alto la importancia de éstos en la revolución industrial y así, con el tic tac la vida y nuestra [cultura](#) cambió.

Un péndulo es en realidad un dispositivo muy sencillo que cualquiera puede construir en su casa. Sólo se necesita un objeto con cierta masa, puede ser una piedra o una plomada y un trozo de cuerda o hilo de cáñamo. El objeto se ata primero a un extremo de la cuerda y el otro extremo se sostiene con los dedos o se

ata a una varilla. Después se sostiene la plomada en un lado con el hilo tenso, para luego soltarla. Así comenzará a moverse de un lado a otro como se muestra en la figura 1. Si deseas ver una pequeña animación [pulsas aquí](#).

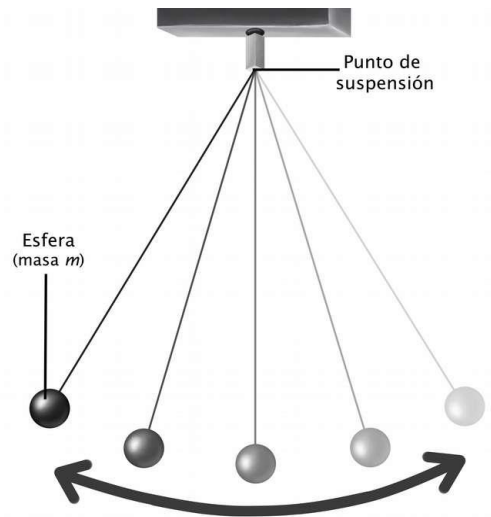


Figura 1. Esquema del péndulo, la masa (en negro) está atada a un extremo de la cuerda, mientras el otro extremo se fija a un punto. El movimiento del péndulo consiste en oscilaciones que describen un segmento de círculo. En la figura se representan en blanco las posiciones donde ha estado la esfera de masa  $m$ . Imagen modificada de <http://imgarcade.com/1/galileo-inventions-pendulum/>

Se cuenta que Galileo descubrió el péndulo en 1583, cuando observó el balanceo de un candelabro en la catedral de Pisa. Se percató de que a pesar de que la amplitud de sus oscilaciones disminuía gradualmente, su duración o periodo no variaba, algo que parecía ir en contra de la intuición. Si se mide el tiempo que le toma a un péndulo de 50 cm oscilar 10 veces (14.2s) y se compara con el periodo de 30 oscilaciones (tres veces más), se verá que en efecto en este último caso pasa el triple de tiempo (42.6s); a pesar de que la amplitud después de 30 oscilaciones es menor que la inicial, pues se disipa energía por la fricción del aire.

Galileo hizo otros descubrimientos acerca del péndulo, por ejemplo encontró que el periodo depende de la raíz cuadrada de la longitud de la cuerda ( $T \sim \sqrt{l}$ ), y que es independiente de la masa del objeto suspendido. También observó que con una longitud fija, todos los periodos son iguales, es decir que cada oscilación dura el

mismo tiempo (ver este [enlace](#)).

Las propiedades del péndulo lo hacen un dispositivo muy útil, por ello Galileo propuso construir relojes de péndulo. Aunque no pudo ver la materialización de su propuesta, años después de su muerte, los péndulos sirvieron para fabricar los relojes usados para calcular las rutas de navegación de los barcos (ver en Cienciorama “[La historia del relojero astuto y el astrónomo desalmado](#)”). Una aplicación muy curiosa que Galileo ideó y si realizó, fue la de utilizar el péndulo para medir el pulso cardiaco de las personas. Lo anterior es posible si se ajusta la longitud del péndulo hasta acoplar su periodo con las pulsaciones de un individuo, esto es posible ya que el periodo depende de la longitud ( $T \sim \sqrt{l}$ ) (ver figura 2).

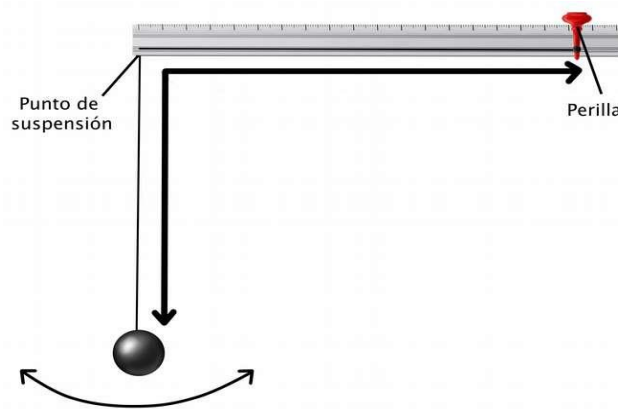


Figura 2. En la imagen se muestra un péndulo cuyo punto fijo está en el extremo izquierdo, la longitud del cordón se puede variar con ayuda de una perilla (roja) que además indica la longitud del péndulo; así se puede determinar el periodo, es decir el tiempo de cada oscilación ( $T \sim \sqrt{l}$ ). Imagen extraída de la referencia 2.

La sencillez de los fenómenos físicos involucrados con el péndulo permitió estudiarlos sin demasiadas complicaciones. Para dar una idea de cómo el péndulo contribuyó al conocimiento de algunos fenómenos naturales, se puede hacer un recorrido del desarrollo de la física a través de algunos estudios que hicieron científicos como Galileo, Huygens, Newton y otros menos conocidos como Eduard Condon, quién se podría decir, llevó el péndulo a la mecánica cuántica y después se pudo aplicarlo a

la física molecular.

### **Construyendo la ciencia con un péndulo**

Galileo intercambiaba correspondencia con sus colegas y por allá de 1602 mantuvo comunicación con Guiobaldo del Monte, un fuerte crítico de sus afirmaciones sobre el péndulo. En esos intercambios epistolares se vislumbran varias características de la forma de hacer ciencia de Galileo y que hoy en día son aspectos centrales de la práctica científica.

En primer lugar, Galileo podía exagerar un poco mientras argumentaba a favor de sus descubrimientos ya que en ocasiones no contaba con todos los elementos para convencer a sus interlocutores sobre la veracidad de sus hallazgos, y lo hacía porque buscando que creyeran en sus resultados. Esto es algo de mucha utilidad para todo aquel que quiera dedicarse a hacer ciencia, ya que la comunicación de los resultados es fundamental en esta actividad y muchas veces para conseguir financiamiento o para publicar se deben adornar los hallazgos.

En segundo lugar Galileo trataba de ir más allá del sentido común, que en aquella época era dominado por el pensamiento aristotélico. Él consideraba varias formas de explicar los fenómenos aunque contradijeran las creencias comúnmente aceptadas y además buscaba evidencias que sustentaran dichas explicaciones. Otro aspecto importante a destacar en este intercambio epistolar de Galileo es la comunicación de sus procedimientos de trabajo y de como abstraía e idealizaba los fenómenos naturales para poder estudiarlos.

Galileo reconocía que existían elementos que causaban errores sistemáticos en los experimentos --*impedimentos* para Galileo--, los cuales provocaban que no siempre se cumplieran las predicciones hechas; sin embargo, al ignorarlos temporalmente se hacía posible explicar ciertos aspectos de los fenómenos y hallar regularidades en la naturaleza. Galileo pudo por ejemplo concluir sus hallazgos sobre el péndulo ignorando la fricción que en determinado momento hace que éste se detenga. Para poder determinar qué se puede ignorar y qué no en cada caso, es necesario probar experimentalmente lo que se supone en forma idealizada; para esto hay que ser muy sistemático en los experimentos, cosa que Galileo hacía muy bien, como muestra de

su pericia basta decir que él fue capaz de medir intervalos de tiempo de  $1/92$  segundos.

Por otro lado, la abstracción que hizo Galileo al estudiar el péndulo queda patente en los análisis que hizo de su movimiento. Él consideró segmentos muy pequeños de recorrido durante las oscilaciones, de modo que le fue posible aproximar a cada punto de la trayectoria circular una línea tangente, la cual Galileo relacionó con el movimiento de una masa bajando por un plano inclinado (ver figura 3). El uso de planos inclinados a su vez fue de suma importancia para que Galileo pudiera estudiar la caída de los cuerpos, por ejemplo desde la torre de Pisa, ya que al intentar estudiar este fenómeno de forma directa se dio cuenta de la dificultad para hacer registros, dada la rapidez con que un objeto desciende. De este modo Galileo relacionó tres fenómenos que parecían diferentes: el movimiento pendular, la caída libre de los cuerpos y el movimiento de un cuerpo en un plano inclinado. Tiempo después Newton juntó las piezas del rompecabezas y concluyó que todos estos fenómenos se deben en realidad a uno: la atracción gravitacional entre objetos con masa.

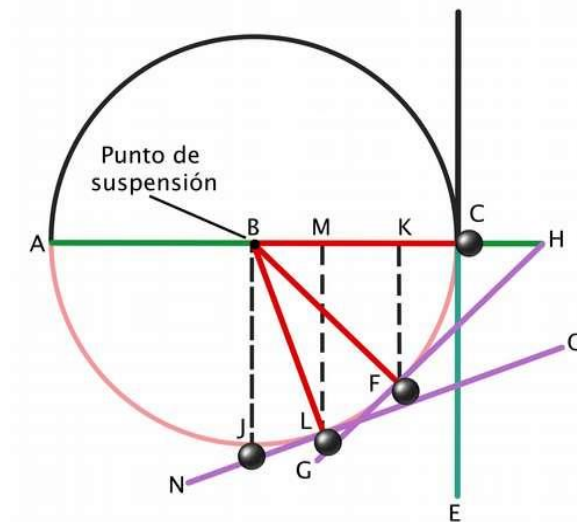


Figura 3. Dibujo hecho por Galileo en 1600 para analizar el movimiento del péndulo (extraído y modificado de la referencia 2). En el esquema se observa un círculo donde el segmento del círculo CA representa la posible trayectoria de un péndulo (en color rosa). Sobre esta trayectoria están indicados los puntos L y F, donde se muestran dos líneas tangentes que representan dos planos

inclinados (en color morado), que Galileo utilizó para estudiar la caída de los cuerpos. Por otro lado, la línea CE (en color verde) indica la trayectoria de un cuerpo en caída vertical. En este esquema se muestran los tres tipos de movimientos que ocuparon la mente de Galileo: el péndulo, el descenso de los cuerpos por planos inclinados y la caída libre.

### La gravedad del asunto

Christiaan Huygens, físico y matemático de los Países Bajos, tuvo un papel muy importante en el empleo de las matemáticas en la física, además refinó la teoría del péndulo y la medición del tiempo hecha por Galileo e hizo su propio diseño de un reloj de péndulo. Estos desarrollos fueron cruciales para resolver el problema de la determinación de la longitud en los viajes marítimos. La longitud es una forma de determinar la posición de algo sobre la superficie terrestre. Consiste en fijar un meridiano, o sea un círculo máximo de la Tierra que pasa por sus dos polos, asumirlo como origen y a partir de él medir los grados (ver “[La historia del relojero asturo y el astrónomo desalmado](#)”). Actualmente el Meridiano de Greenwich es el meridiano cero, ver figura 4.

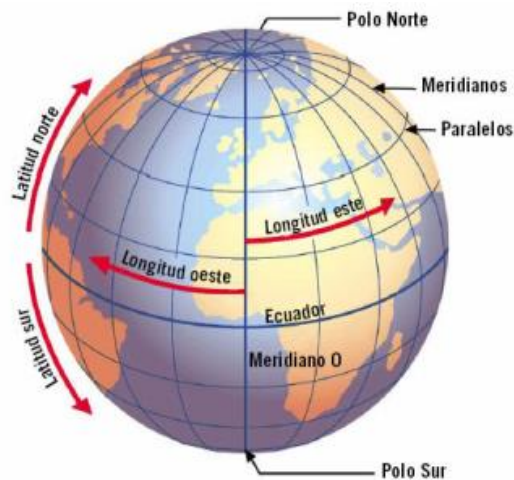


Figura 4. En la imagen se muestra la forma en que se mide la longitud en grados y también cuál es el meridiano cero a partir del que se hacen dichas mediciones. Imagen extraída de <https://cpogeog5aeq131082014.blogspot.mx/2014/09/practica-3-identificando-cartografia.html>

La idea de utilizar relojes en la determinación de la longitud en grados para ubicar barcos en el mar, se basa en la idea de que la Tierra gira sobre su propio eje, 360°

en 24 horas; por lo que en una hora la Tierra avanza  $15^\circ$  o bien  $1^\circ$  cada cuatro minutos. Al fijar el Meridiano de Greenwich como origen, es decir,  $0^\circ$ , se puede suponer que en esa posición el Sol está en su punto más alto a las 12 del mediodía. Por lo tanto si un navío se mueve al este o al oeste, sólo tendrá que ver la hora en la que observa el Sol en la posición más alta. Por ejemplo si en una embarcación se registra lo anterior a las 2:00 pm, el barco se encontrará  $30^\circ$  al oeste del Meridiano de Greenwich, o bien, si el reloj marca las 9:00 cuando el Sol está en su punto más alto se encontrará  $45^\circ$  al este.

Por lo anterior se volvió necesario desarrollar relojes precisos, con los que se pudiera medir el paso del tiempo para conocer la posición de las embarcaciones. Hay quienes aseguran que gracias a este problema por el que se ofrecían grandes sumas de dinero para quién lo resolviera (ver [“La historia del relojero astuto y el astrónomo desalmado”](#) y [“El espacio y el tiempo en el tiempo”](#)) se desarrolló el reloj de péndulo.

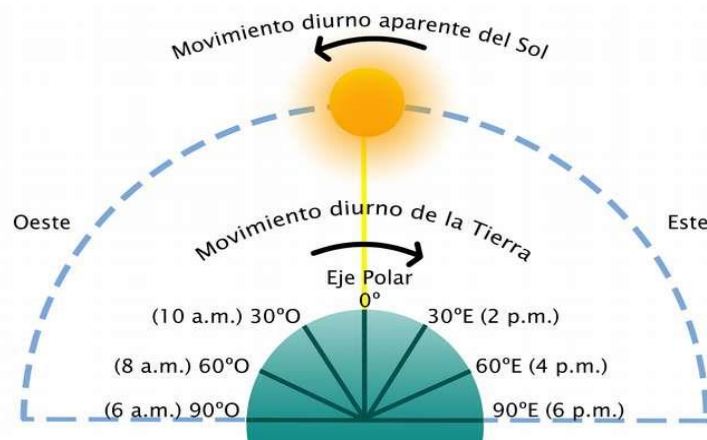


Figura 5. En la imagen se puede observar cómo cambia la posición del Sol a partir del meridiano cero que se elige de forma arbitraria. Imagen extraída de la referencia 2.

Otra de las contribuciones de Huygens al utilizar el péndulo, fue la propuesta de fijar un estándar internacional para medir la longitud en metros. Recordemos que Galileo determinó que el periodo del péndulo depende de su longitud ( $T \sim \sqrt{l}$ ), ver figura 2; Huygens propuso entonces que para construir un péndulo que tuviera un periodo de un segundo, éste tendría una longitud patrón para todo el mundo. Sugirió específicamente medir la longitud del punto de suspensión hasta el centro de la masa

en reposo del péndulo, y posteriormente la longitud resultante se tendría que dividir arbitrariamente en tres partes iguales, y así definió lo que llamó los “pies hora”.

Huygens basaba la definición del patrón de la longitud una suposición. Él era partidario de la teoría del éter que se creía llenaba todo el espacio y dentro de dicha teoría se suponía que cuando los cuerpos rotaban, el éter tendía a ir hacia fuera del centro de giro; como consecuencia empujaba a los cuerpos ordinarios hacia el centro. Con esto se explicaba la atracción gravitacional de los cuerpos en la Tierra, la cual se consideraba constante y por ese motivo Huygens propuso que su patrón de longitud no cambiaría si se reproducía el experimento del péndulo en cualquier parte del mundo.

La propuesta de Huygens se probó en un viaje en barco a Cayena, en la Guayana Francesa, que realizó el astrónomo francés Jean Richer (1630–1696) entre 1672 y 1673. Resultó que el periodo de un mismo péndulo perdía dos minutos y medio al día en Cayena con respecto al periodo medido en Francia. Inicialmente Huygens dudó de la capacidad de Richer para hacer los experimentos pero cada vez se fueron obteniendo más evidencias que apoyaban sus mediciones e incluso Edmund Halley (1656-1742) -físico famoso por calcular la trayectoria del cometa que lleva su nombre y que convenció a Newton de publicar su obra- las corroboró tiempo después. Lo anterior se debe a que la fuerza de gravedad aumentaba de París al ecuador y esto sirvió para poner en duda que la Tierra fuera esférica. Se dice que Newton se enteró de los resultados de Richer años después y los utilizó para determinar que la Tierra en lugar de ser una esfera, esta achatada en los polos, y además utilizó el péndulo para establecer el valor de la constante de gravedad.

### **Todo cae por su propio peso**

El péndulo aparece en la obra de Newton *Principios matemáticos de la filosofía natural* publicada en 1687. Ahí entre los primeros usos que le dio estaba el experimento para determinar si la hipótesis del éter era correcta. Newton analizó la resistencia al movimiento del péndulo cuando estaba inmerso en diversos medios como aire, agua, mercurio, etc., y concluyó que el éter no ofrecía resistencia a las superficies de los cuerpos al moverse y que si en realidad había un efecto de este medio, tendría que



ser la causa de la resistencia del éter en el interior de los cuerpos. Entonces hizo otra serie de experimentos donde colocó una caja en el extremo de un péndulo y la fue llenando gradualmente con metal, para determinar la resistencia cada vez que aumentaba el peso. Con esta serie de pruebas concluyó que la resistencia al movimiento de la caja vacía no variaba con respecto a cuando estaba llena, y de ese modo pudo concluir que el éter no existe.

Determinar la existencia o no del éter fue de gran importancia para que Newton desarrollara su teoría de la gravitación, que establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos con masa ( $m_1$  y  $m_2$ ) depende del producto de las masas y del inverso de la distancia al cuadrado que separa los cuerpos ( $m_1m_2/r^2$ ). Es importante subrayar que Newton asumía que la ley de la gravitación podía explicar el movimiento de la Luna y también la caída de los cuerpos en la Tierra, cosa que en realidad no es trivial deducir. Con el paso de los años se utilizó y perfeccionó la mecánica clásica, cuya base son las leyes de Newton, para explicar un sinfín de fenómenos como el movimiento de los astros, y se llegó a pensar que la física ya estaba terminada, por lo que sólo se necesitaba aplicar la mecánica para explicar lo que surgiera.

Uno de los fenómenos que explica la mecánica clásica y que sin duda es impresionante, es la comprobación de la rotación de la Tierra usando un péndulo. Newton al desarrollar su trabajo supuso siempre que la Tierra giraba sobre su propio eje y esto lo demostró bastante más tarde el físico francés León Foucault (1819 a 1868) por medio de un péndulo conocido ahora como el péndulo de Foucault. Para el experimento sólo requirió un péndulo en el que el punto fijo, donde se suspende el peso (ver figura 1), este libre, de modo que se permite al péndulo oscilar en cualquier dirección y no únicamente en un plano. Para visualizar mejor cómo es este péndulo se puede ver la figura 6 y si deseas ver una animación en cámara rápida de éste fenómeno [pulsa aquí](#).

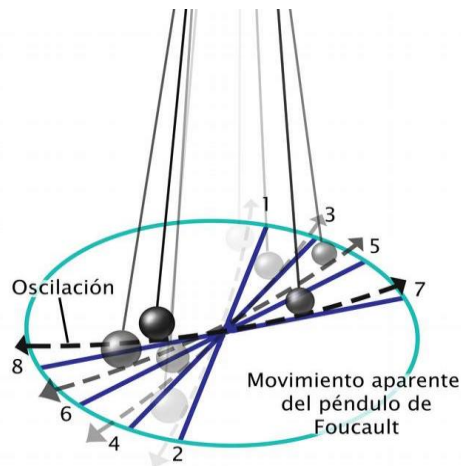


Figura 6. Esquematización de la rotación del plano en el que oscila el péndulo. Se muestran las posiciones de las masas en dos planos diferentes que forman un cierto ángulo. Por ejemplo la línea entre 1 y 2 representa un plano de oscilación; de igual forma 3 y 4, 5 y 6, 7 y 8.

El péndulo de Foucault consiste en la rotación del plano de oscilación debido al giro de la Tierra sobre su propio eje y el comportamiento de este fenómeno varía con la latitud donde se realice el experimento (ver figura 4). Si el experimento se realiza en el Polo Norte, se observará que el ángulo de rotación del plano de oscilación (ver figura 6) tarda 24 horas en girar  $360^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj, es decir que dará una vuelta completa en un día; si se lleva a cabo en la Ciudad de México tardará aproximadamente 74 horas para hacer un giro completo. Por otro lado, para latitudes debajo del ecuador el sentido de giro es contrario al de las manecillas del reloj. En Bolivia el plano de giro completa una vuelta en un tiempo cercano a 82 horas, mientras que en el Polo Sur da una vuelta de  $360^\circ$  en 24 horas.

### El baile de las moléculas

Hemos realizado un recorrido bastante largo sobre los avances del conocimiento científico a partir del estudio del péndulo, y para cerrar esto les platicaré un poco acerca de cómo se utiliza la idea del péndulo en la mecánica cuántica. La primera vez que apareció el péndulo en la mecánica cuántica fue en 1928 en una publicación del físico Eduard Condon quien fue uno de los pioneros de la física atómica.

Antes de hablar más del péndulo en la mecánica cuántica debe señalarse que cuando el péndulo clásico se restringe a oscilaciones pequeñas (menores de  $10^\circ$ ) el sistema es equivalente al movimiento de un [resorte con una masa](#) (ver la figura 7)

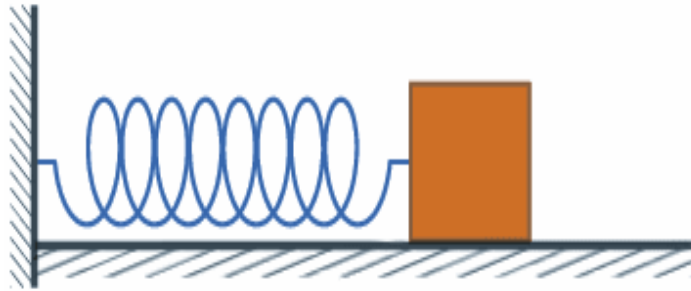


Figura 7. En la figura se observa un resorte que en uno de sus extremos tiene una masa, mientras el otro extremo está fijo a una pared. El resorte puede oscilar hacia adelante y atrás debido a su fuerza que se resiste a que lo estiren o que lo compriman.

Con esta imagen en mente es fácil visualizar una de las principales aplicaciones para el péndulo cuántico, se trata de idealizar a las moléculas como esferas unidas por un resorte y analizar así sus propiedades físicas, algunos tipos de enlaces químicos entre átomos y la dinámica molecular para el estudio de los materiales, entre otras muchas cosas que dan para entretenerse otro rato, pero mientras lo dejaremos así.

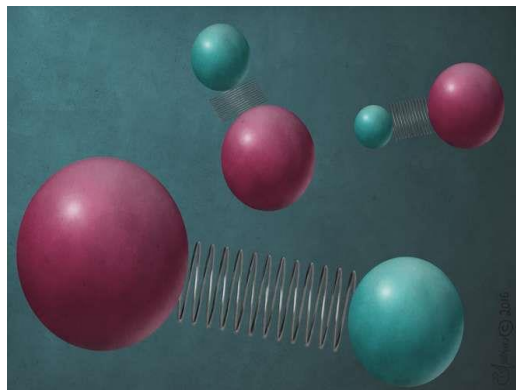


Figura 8. Esquematización de moléculas. En la figura se muestran esferas de distinto color unidas mediante un resorte. El color sirve para diferenciar a los átomos que componen a la molécula y mediante el resorte podemos representar la unión o enlace que mantiene a la molécula unida. Puede suceder que las moléculas oscilen de modo que los átomos se atraigan y se repelan, por lo que es posible idealizar al sistema con las esferas y el resorte.

Hasta aquí se mostró un recorrido rápido del uso del péndulo, desde el siglo XVI hasta nuestros días. Con él fue posible desarrollar la física tal como la conocemos hoy y sin duda sigue siendo fundamental para su avance, tanto que todo físico carga un péndulo en el bolsillo. Si conoce a alguno pregúntele acerca del péndulo y pídale que haga una demostración de su funcionamiento mientras explica las maravillas de este artefacto.

Además se aprovechó la ocasión para dar una visión muy rápida de cómo se construye el conocimiento en física, un proceso en el que participa una gran comunidad de personas dedicadas a su estudio, en el que se intercambian ideas, se exponen hallazgos y se argumenta a favor o en contra de ellos, ya sea para apoyar una teoría o para intentar derribarla, con la intención de construir una completamente nueva y mejor, o bien ponerle parches para que siga andando otro tramo. Con todo esto se puede ver al péndulo como un caso paradigmático que permite mirar este proceso al que muchas personas contribuyen para hacer avanzar la ciencia paso a pasito.

## Referencias

1. Newton, R. G. y Newton, R. G, *Galileo's Pendulum: From the Rhythm of Time to the Making of Matter*. Harvard University Press, Harvard, 2009.
2. Baker, G. L y Blackburn, J. A., *The pendulum: a case study in physics*. Oxford University Press, Oxford, 2005.
3. Matthews, M. R., *Time for science education: How teaching the history and philosophy of pendulum motion can contribute to science literacy*, (vol. 8), Springer Science & Business Media, 2012.
4. Nola, R., "Pendula, models, constructivism and reality", en *The Pendulum*, Springer Netherlands, 2005, pp. 237-265.
5. Machamer, P. y Hepburn, B., "Galileo and the Pendulum: Latching on to Time", *Science & Education*, 2004,. 13(4-5), 333-347.
6. Condon, E. U., "The physical pendulum in quantum mechanics" *Physical Review*, 1928, 31(5), 891.