

Conservación de la energía mecánica con un péndulo simple en una experiencia online

Online experiment for the conservation of mechanical energy with a simple pendulum

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Renan F. Correa¹, Marcos de L. Leite^{1,2}, Vito R. Vanin¹, y Nora L. Maidana¹

¹Instituto de Física da Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1371 – CEP 05508-090 – São Paulo, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo

E-mail: nmaidana@if.usp.br

Resumen

Hemos analizado la energía mecánica de un péndulo simple en movimiento a partir de las imágenes extraídas de su filmación, siguiendo la metodología estándar de trabajo con que fueron obtenidos los casos de la página web Mecánica Experimental con Imágenes (MEXI, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto/>>). Con los valores de posición angular en función del tiempo leídos en las respectivas imágenes, es posible obtener las energías potencial gravitacional y cinética, y validar la conservación de la energía mecánica. Como expectativas futuras de trabajo, el equipo espera obtener imágenes de otras configuraciones experimentales del péndulo simple, con variación de la longitud de la cuerda, de la masa del cuerpo y de la amplitud inicial del movimiento.

Palabras clave: Experimentación con imágenes; Conservación de la energía con un Péndulo Simple; TDIC.

Abstract

We have analysed the mechanical energy in a simple pendulum in motion based on images extracted from its video following a methodology similar to that applied to other cases that can be found on the web page Experimental Mechanics with Images (MEXI, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto/>>). With the values of angular position as a function of the time, read from the images, it is possible to deduce the gravitational potential and kinetic energies, and validate the conservation of the mechanical energy. We expect to obtain images of other experimental arrangements of the simple pendulum with different string lengths, body masses and oscillation amplitudes.

Keywords: Experimentation with images; Energy conservation with a Simple pendulum; TDIC.

I. INTRODUCCIÓN

La experimentación busca la comprensión de ciertos contenidos por parte de los estudiantes por asociación entre lo abstracto de la física y las formas del lenguaje (Séré y otros, 2003). Uno de los objetivos de las experiencias en laboratorios didácticos consiste en ayudar a los alumnos a aplicar la teoría estudiada para su internalización. Por otro lado, las herramientas y técnicas utilizadas en algunos experimentos pueden servir para aquellos que quieran continuar su actividad profesional como investigadores (Grandini y Grandini, 2008). Sin embargo, aun siendo importante la práctica de laboratorio, muchas instituciones de enseñanza que poseen laboratorios didácticos no los utilizan por innumerables motivos: falta de planificación del profesor, de mantenimiento del material, escases de materiales, etc. (Borges, 2002). Delante de esos problemas, las Tecnologías Digitales de la Información y de la Comunicación (TDIC) abren una nueva posibilidad de estudio y práctica pues, por medio de computadoras o smartphones, los alumnos pueden observar y analizar los fenómenos presentes en experimentos físicos. No obstante, para maximizar el efecto pedagógico de esas tecnologías, el profesor necesita planificar correctamente esas actividades para contribuir con el proceso de aprendizaje del estudiante sin distracciones (Costa, 2017).

La página web *Mecánica Experimental con Imágenes* (MEXI) (antiguo Laboratorio Virtual de Mecánica) dispone de varios experimentos que pueden ser usados para contextualizar diversos tópicos de mecánica básica. Ella fue creada con la intención de complementar la acción del profesor al trabajar conceptos abstractos de manera experimental (Fonseca y otros, 2013). En determinadas condiciones, una imagen puede brindar simultáneamente las magnitudes posición y tiempo. Así, con un conjunto de imágenes sucesivas provenientes de un video es posible determinar grandezas derivadas como velocidad, aceleración y fuerza. En las construcciones experimentales de MEXI, los cuerpos en estudio son filmados moviéndose junto a un instrumento que permite la medida de su posición. Cintas métricas, cuadrículados, transportadores, círculos graduados etc. pueden ser el instrumento que permite dicha medida. Como los videos son gravados con tasas de captura conocidas, se sabe con precisión el intervalo de tiempo entre imágenes sucesivas y de esa forma, el instante en que cada una de las imágenes fue capturada. A ese instante lo llamamos código de tiempo y puede ser incorporado a cada una de las imágenes.

Abordaremos aquí los procesos de concepción y elaboración de una experiencia online con un péndulo simple, cuyo objetivo central es el estudio de la conservación de la energía mecánica para oscilaciones con amplitud pequeña (Young y Freedman, 2008). En las próximas secciones, serán detallados el aparato experimental, el proceso de obtención de las imágenes, el análisis preliminar de un conjunto de imágenes, los resultados obtenidos y las expectativas e intenciones relacionadas a la aplicación de esta experiencia.

II. MARCO TEÓRICO

Las guías de trabajo de la página MEXI poseen, en general, una secuencia de acciones que consiste en: i) un sondeo sobre los conocimientos que posee el estudiante, que puede aparecer como una pregunta motivadora, al solicitarle una explicación del experimento observado en el video, tomando como base sus propias concepciones, con el objetivo de hacerlo pensar sobre el fenómeno, ya que normalmente le estimula la curiosidad; ii) la realización de la experiencia en sí (recolección y análisis de datos); iii) la verificación de una teoría física a partir de los resultados experimentales y iv) una comparación de las explicaciones iniciales del estudiante con las previstas por el formalismo físico y experimental. Según Ausubel (1978, *apud* Fonseca, 2015), el conocimiento previo de un estudiante es importante para el proceso de aprendizaje, pues la ampliación y reorganización de conceptos ya existentes son esenciales para la consolidación del conocimiento en construcción. Las actividades de MEXI fomentan esa idea pues el camino propuesto para realizar las experiencias contempla tanto la evocación de las concepciones previas del alumno como su comparación con lo que se obtiene experimentalmente y lo que la teoría física pronostica. Por otro lado, el ideal de una alfabetización científica también está contemplado, ya que las ideas de los alumnos pueden ser confrontadas o corroboradas con los resultados de las experiencias, llevándolos a analizar y construir explicaciones para los fenómenos en estudio (Ferraz, 2015).

Según Alves y otros (2017), un problema parametrizado puede ser definido como aquel que, siendo cerrado, posee distintos valores numéricos y/o conjuntos de datos sobre los cuales se establece un mismo camino de resolución. Bajo esa perspectiva, se puede afirmar que los experimentos de la página MEXI pertenecen a esa categoría, ya que cada actividad posee varios conjuntos de datos para analizar. Cuando realizados en grupo, los problemas parametrizados tienen el potencial de fomentar el aprendizaje colaborativo entre los participantes, al permitir discusiones acerca de las etapas necesarias para su resolución (Alves y otros, 2017). Además, un camino didáctico que favorezca el aprendizaje colaborativo tiene el potencial de contribuir con la formación de los ciudadanos, en especial los aspectos relacionados a la ganancia de autonomía y a la coparticipación para alcanzar los objetivos de las actividades propuestas (Abegg y otros, 2010).

Las Directrices Curriculares Nacionales brasileñas (DCN) para los Cursos de Física (Brasil, 2001), indican que un graduado en física debe poseer habilidades y vivencias para:

...utilizar la matemática como lenguaje para la expresión de los fenómenos naturales;
...resolver problemas experimentales, desde su contacto y la realización de medidas, hasta el análisis de los resultados;
...usar equipamiento de informática;
...entrar en contacto con ideas y conceptos fundamentales de Física y de Ciencias, por medio de la lectura de textos básicos. (p. 4-5, traducción propia)

A partir del formato de actividades desarrolladas en la página MEXI, se buscará presentar en este trabajo una propuesta de experiencia con una característica similar a la de los problemas parametrizados que posea un camino de realización inspirado en las habilidades y vivencias señaladas en las DCN para los Cursos de Física.

III. MATERIALES

El aparato experimental del péndulo simple incluye: i) un transportador con fondo blanco, que permite visualizar con mayor claridad las marcas graduadas, que se fija a una mesa por medio de un pedestal de acrílico; ii) una cuerda colorida de longitud ajustable, que sustenta la masa a pendular. En el centro del transportador fue hecho un orificio circular para introducir un cilindro metálico, que permite fijar una extremidad de la cuerda. Ese soporte garantiza un ajuste que, cuando el péndulo está parado, la cuerda reposa sobre la posición angular igual a 270° , como se observa en la figura 1.

Las condiciones iniciales del conjunto analizado aquí para las masas del péndulo y de la cuerda, fueron: 8,37(1) g y 0,02(1) g, respectivamente, siendo la primera una esfera de plomo y la segunda una cuerda inextensible con 0,2905(5) m. Para las grabaciones usamos una cámara Sony Nex-FS700NK, con la cual es posible obtener tasas de registro, de hasta 960 *fps* (cuadros por segundo). Un trípode ajustable permitió fijar la cámara con el eje del sistema óptico perpendicular a la superficie del transportador, el centro del encuadramiento a aproximadamente 10 cm por debajo del cilindro metálico y a 16 cm de distancia del transportador.

IV. OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES

La masa del péndulo fue alejada de la posición de equilibrio, hasta alcanzar una amplitud inicial de aproximadamente 10° . Se tuvo el cuidado de hacer con que el plano por donde el péndulo iría oscilar fuese paralelo al del transportador, para evitar errores sistemáticos de lectura y posibles colisiones.

La filmadora fue ajustada para registrar el movimiento pendular a una tasa de 480 *fps*. Se grabaron aproximadamente dos oscilaciones completas para cada conjunto. Los videos obtenidos fueron editados con el programa *Edius Pro 7*, que también permite ajustar brillo, saturación y extraer los cuadros independientes. El instante de tiempo de cada una de las imágenes fue incorporado a ellas con auxilio del programa *Wolfram Mathematica 12*. Ese instante registrado en las imágenes es el llamado “código de tiempo”, que aparece en la esquina inferior izquierda de la figura 1.

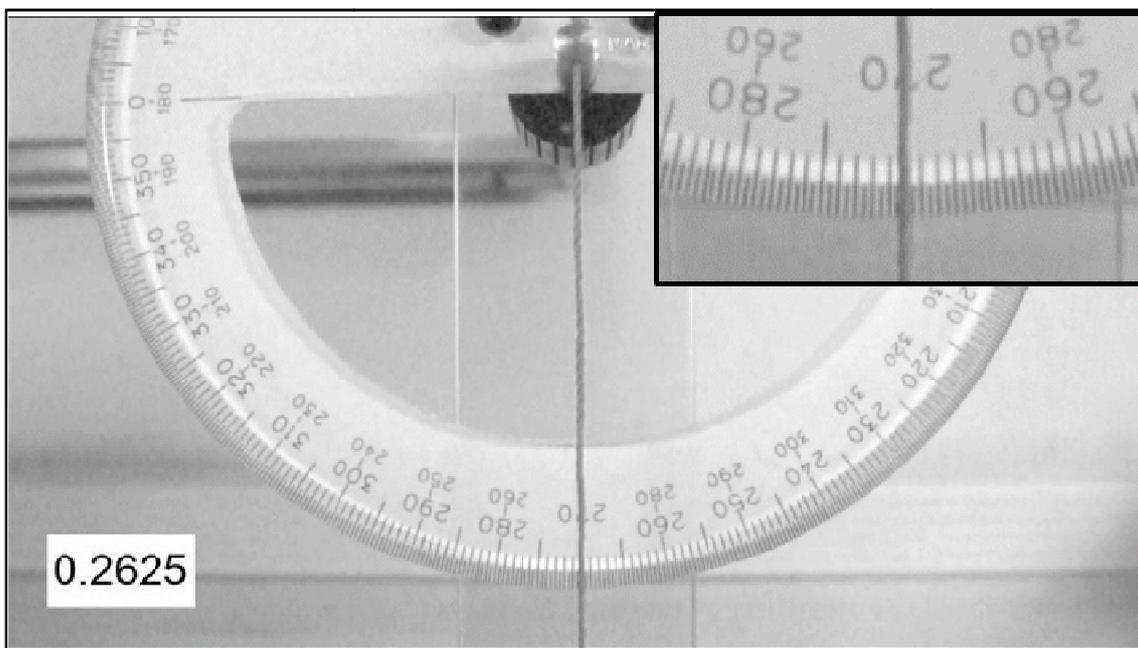


FIGURA 1. Imagen del transportador y de la cuerda que soporta la masa del péndulo. Detrás del transportador se ve el pedestal que lo fija a la mesa horizontal. La figura sobrepuesta de la esquina superior derecha muestra una ampliación del aparato experimental en posición de reposo, donde se puede verificar la espesura de la cuerda.

V. PROCESO DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE DATOS

La recolección de datos comienza con la medida y registro de las sucesivas posiciones angulares (φ) de la cuerda en una hoja de cálculos. Las lecturas fueron tomadas observando el tiempo (t), correspondiente al instante de cada imagen y la posición derecha de la cuerda, que posee un espesor no despreciable, en las marcas del transportador, con la intención de evitar errores sistemáticos y hacer coincidir el centro geométrico de la misma con el valor esperado de cada medida. Fue sustraído $0,5^\circ$ de todas las lecturas, por considerar que el centro geométrico de la cuerda estaba dislocado a la izquierda del valor medido. Para hacer coincidir la marca de 0° con la posición de reposo, se sugiere realizar una mudanza de referencial, donde:

$$\varphi_{definitivo} = \varphi_{leído} - 270,5^\circ \quad (1)$$

Con los valores de posición angular y tiempo medidos, se calcula la velocidad angular en cada instante de tiempo con:

$$\omega(t_i) = \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (2)$$

donde φ_{i+1} y φ_{i-1} son las posiciones angulares anterior y posterior a la analizada, respectivamente. La velocidad tangencial, v fue obtenida con:

$$v(t_i) = \omega(t_i) \cdot r \quad (3)$$

con r igual a la longitud medida desde donde la cuerda abandona el cilindro metálico hasta el centro geométrico de la masa del péndulo.

Las energías cinética K y potencial gravitacional U son:

$$K(t_i) = \frac{m \cdot [v(t_i)]^2}{2} \quad (4)$$

$$U(t_i) = mgr[1 - \cos \varphi(t_i)] \quad (5)$$

siendo m la masa del péndulo y g el valor local de la gravedad, igual a $9,78 \text{ m/s}^2$.

Finalmente, se calcula la energía mecánica E a partir de la suma entre las energías cinética y potencial gravitacional para cada instante de tiempo:

$$E(t_i) = K(t_i) + U(t_i) \quad (6)$$

La masa de la cuerda fue desconsiderada para este experimento por ser mucho menor que la masa de la esfera de plomo.

VI. RESULTADOS TÍPICOS DEL EXPERIMENTO

Las energías cinética, potencial y mecánica total en función del tiempo pueden ser observadas en el gráfico de la figura 2. La recta constante del gráfico (línea punteada de color negro) coincide con el valor medio de la distribución de valores de energía mecánica.

Las barras de incertidumbre de los valores de las energías cinética y potencial fueron calculadas por propagación de errores de los desvíos experimentales de las magnitudes básicas, de acuerdo con las ecuaciones (4) y (5). Por otro lado, el desvío estándar de los valores de energía mecánica fue calculado y usado como incertidumbre de cada punto del gráfico de la figura 2.

En ese gráfico es posible observar que mientras los valores de las energías cinética y potencial oscilan alternativamente entre cero y un valor máximo, los de energía mecánica se distribuyen alrededor de ese último. Se puede decir que la energía mecánica se conserva dentro del intervalo de tiempo analizado, dado que más del 68% de los valores se encuentra a menos de un desvío estándar del valor medio.

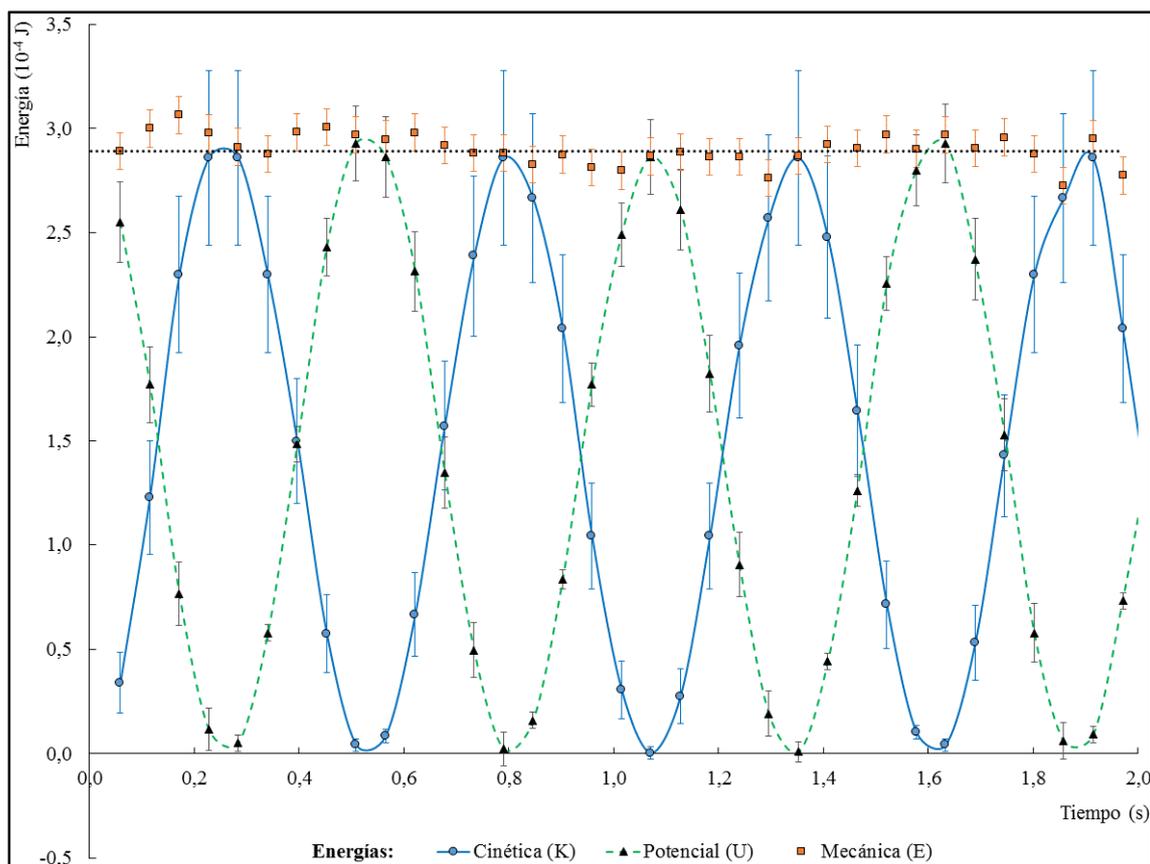


FIGURA 2. Gráfico de la evolución temporal experimental de las energías cinética, potencial y mecánica para aproximadamente tres oscilaciones del péndulo. Fueron adicionadas líneas suavizadas a los valores de las energías cinética y potencial para facilitar la identificación de dichas magnitudes. La recta punteada de color negro fue trazada en el valor medio de la energía mecánica.

VII. PROPUESTA DE APLICACIÓN

Después de extraer todas las imágenes del video de cada situación experimental, se obtienen varios conjuntos diferentes e independientes. Las imágenes de cada conjunto son seleccionadas de manera tal que el intervalo de tiempo entre dos imágenes sucesivas sea el mismo. La tarea inicial del profesor es destinar uno, de los varios conjuntos disponibles en la página web MEXI, a cada equipo de estudiantes, para garantizar la parametrización de la actividad.

Un modelo de guía de trabajo de la experiencia online, con modalidad presencial está disponible en <http://fep.if.usp.br/~fisfoto/rotacao/penduloSimples>. Sugerimos que cada grupo esté compuesto por dos o tres estudiantes; la carga de trabajo es relativamente alta y la propuesta es imaginada para ser realizada en aproximadamente dos horas aula consecutivas. Esa guía posee un conjunto de instrucciones que hacen trabajar a los estudiantes de manera simultánea al usar una planilla electrónica de cálculos y registrar el análisis de los resultados y respuestas a las preguntas que dirigen la discusión.

La construcción de la guía fue ideada para que cada grupo realice el trabajo de forma independiente, pero la presencia del profesor es fundamental, dado su papel mediador frente a las necesidades de explicar algún aspecto teórico, de cómo introducir los valores medidos en la hoja de cálculo o de realizar las operaciones.

La actividad de los estudiantes comienza con la observación del video del movimiento del péndulo y la tentativa de inferir, a partir del primer paso, si la energía de ese sistema físico se conserva. Ellos pueden usar cualquier característica del aparato y su movimiento, como, por ejemplo, observar la máxima amplitud alcanzada por el péndulo en cada oscilación. En ese punto el profesor puede intentar extraer las concepciones intuitivas de los participantes con relación a la energía mecánica. Luego de medir las posiciones y los códigos de tiempo, de todo el conjunto de imágenes, se calculan velocidades, energías y se inicia el análisis de los resultados, que permite comparar las expectativas previas con los resultados del fenómeno estudiado.

La guía de trabajo propuesta en la página MEXI es simplemente una sugerencia para que los profesores interesados la usen. Ese material puede ser empleado de diferentes maneras y dependerá de los objetivos didácticos de cada profesor, del lugar en que la actividad sea implementada y del curso en que fuera aplicada. Por ejemplo, si fuese propuesta al inicio de un curso de mecánica, su implementación precisaría ser más mediada y detallada. Pero, si ocurriera al final de un curso, su abordaje podría ser más investigativo, con menos intervención por parte del profesor. Además de contemplar el balance de energías, se podrían determinar también las fuerzas que actúan sobre el péndulo en el movimiento oscilatorio; en ese caso, se podría inclusive optar por la determinación de las fuerzas en un sistema de coordenadas radial, en general poco usado experimentalmente.

VIII. CONSIDERACIONES FINALES

Describimos una estrategia didáctica alternativa usando una TDIC para los experimentos que generalmente son usados en laboratorios. Es posible afirmar que la experiencia del péndulo simple puede contribuir con las habilidades y vivencias marcadas en las DCN para los cursos de física, ya que, los cuadros posibilitan la medida de posición y tiempo y se analiza el avance temporal del movimiento. Se usa una hoja de cálculos para el registro de las medidas y operaciones matemáticas para obtener las energías cinética, potencial gravitacional y mecánica, y así verificar si hubo conservación de energía, de acuerdo con lo estudiado con el profesor y con el libro de texto.

Obtuvimos la energía mecánica a partir de la suma de energías cinética y potencial, en función del tiempo; el valor medio de energía mecánica se encuentra a menos de un desvío estándar de los valores calculados para cada instante de tiempo, confirmando que hubo conservación de energía. La metodología de filmación (posición de la cámara, tasa de obtención y resolución de las imágenes para la lectura, inserción del código de tiempo, etc.) permitirá obtener nuevos videos con cambios de longitud de la cuerda, masa del péndulo y amplitud inicial para conseguir un número significativo de conjuntos que puedan completar esta experiencia en la página MEXI. Dado el bajo nivel de complejidad de los cálculos, estimamos que esta experiencia pueda ser aplicada tanto a alumnos de grado en disciplinas de mecánica básica como a estudiantes de enseñanza media.

AGRADECIMIENTOS

A la Pró-Rectoría de Grado de la Universidad de São Paulo (USP), por la concesión de la beca del Programa Unificado de Bolsas (PUB), al Laboratorio de Demonstraciones del Instituto de Física – USP y al taller de Electrónica del Laboratorio del Acelerador Lineal, por auxiliar en la confección del aparato experimental, y a la FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) por el apoyo económico de los proyectos número 014/08206-0 y 019/11569-0.

REFERENCIAS

- Abegg, I., Bastos, F. P., Müller, F. M. (2010). Ensino-aprendizagem colaborativo mediado pelo Wiki do Moodle. *Educar em Revista*, (38), 205-218.
- Alves, J., Sauerwein, R. A. y Pastorio, D. P. (2017). Resolução de problemas parametrizados: uma estratégia para estimular a aprendizagem colaborativa. *Revista de Enseñanza de la Física*. 29(Extra), 113-119.
- Borges, A. T. (2002). Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(3), 291-313.
- Brasil, Ministério da Educação. (2001). Conselho Nacional de Educação, Parecer CNE/CES 1304/2001. *Diretrizes Nacionais Curriculares para os cursos de física*. Diário Oficial da União. Brasília, 07 dez. 2001. Seção 01, p. 25. <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf> Sitio consultado en junio de 2019.
- Costa, L. P. (2017). O uso das tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) na prática pedagógica do professor de matemática do ensino médio. Tesis de Maestría. Universidade Federal do Paraná. <http://hdl.handle.net/1884/49344> Sitio consultado en junio de 2019.

Ferraz, A. T. (2015). Propósitos epistêmicos para a promoção da argumentação em aulas investigativas de física. Tesis de Maestría. Universidade de São Paulo. DOI 10.11606/D.81.2015.tde-25112015-151619 Sitio consultado en junio de 2019.

Fonseca, M., Maidana, N. L., Severino, E. Z. G., Barros, S. F., Senhora, G. G. M., Vanin, V. R. (2013). O laboratório virtual: Uma atividade baseada em experimentos para o ensino de mecânica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(4), 4503.

Fonseca, M., Maidana, N. (2015). Evaluación de la experiencia virtual “giroscopio”: procesos de razonamiento cognitivo de los alumnos. *Revista de Enseñanza de la Física*. 27(Extra), 453-461.

Grandini, N. A., Grandini, C. R. (2008). Laboratório didático: importância e utilização no processo ensino-aprendizagem. *XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, 21-24 outubro, Curitiba, Paraná, Brasil.

Séré, M., Coelho, S. M., Nunes, A. D. (2003). O papel da experimentação no ensino da física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(1).

Young, H. D., Freedman, R. A. (2008). *Física II: Termodinâmica e Ondas*. São Paulo: Pearson Addison Wesley.