

Crítica a la formulación teórica del problema del *loop* desde el punto de vista experimental

A critique to the theoretical formulation of the *loop* problem from an experimental point of view

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Laís de O. Borges¹, Marcos de L. Leite^{1,2}, 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@usp.br

Resumen

Los libros didácticos de física para niveles medio y superior generalmente abordan el problema clásico del *loop* como un ejemplo de aplicación del Principio de Conservación de la Energía Mecánica y proponen que cuando el cuerpo es abandonado sobre la rampa de entrada a una altura mínima conveniente, la fuerza normal sobre la esfera, en el punto más alto de la trayectoria circular sea nula. Estas formas de resolución envuelven la adopción de un modelo físico detrás del problema, cuyas peculiaridades generalmente no se discuten ni se explican. Este texto propone analizar el problema del *loop*, desde un enfoque experimental como inicio, el planteo sobre la conveniencia de adoptar dicho modelo, para finalmente comentar sobre la falta de discusión y explicación del modelo teórico simplificado adoptado en los libros y en las clases de resolución de problemas.

Palabras clave: Enseñanza de la mecánica; Modelo teórico; Experimento online; Problema del *loop*.

Abstract

Medium and higher levels physics textbooks generally address the classic problem of the loop as an example of application of the Principle of Conservation of Mechanical Energy and propose that when the body is abandoned on the entrance ramp at a convenient minimum height, the force normal on the sphere, at the highest point of the circular path is zero. These forms of resolution involve the adoption of a physical model behind the problem, whose peculiarities are usually not discussed or explained. Here we propose to analyze the problem of the loop, from an experimental approach as a start, the question about the convenience of adopting the model, to finally discuss the simplified theoretical model adopted in the books and in classes of problems resolution.

Keywords: Mechanics teaching; Theoretical model; Online experiment; Loop problem.

I. INTRODUCCIÓN

Los libros de texto de disciplinas introductorias de Mecánica Clásica, tanto en la Educación Superior como en la Escuela Secundaria, abordan el problema del *loop* desde el formalismo de la conservación de la energía, aunque su concepción se remite a la dinámica de los movimientos circulares. Se enuncia el problema considerando que el cuerpo (que se supone como una partícula sin dimensiones) se mueve sobre una pista, y realiza una trayectoria circular en un plano vertical cuando se lo abandona, a una cierta altura de una rampa, como siendo la mínima necesaria para que complete la vuelta. El problema clásico reside en la determinación de esa altura (Sampaio y Calçada, 2005; Halliday y otros, 2008). La resolución típica propone un cierto modelo físico en el que a lo largo de la trayectoria se conserva la energía mecánica; un hecho físico que solo ocurriría si no hubiera fuerzas disipadoras que actúen sobre el cuerpo (como fricción con la superficie de contacto, aire etc.). Además, se supone que como el cuerpo es abandonado a la altura mínima para completar la vuelta, al llegar a la parte superior del *loop* es inminente su desprendimiento, lo que implica que la fuerza normal en ese punto sea nula y que el cuerpo continúe moviéndose por inercia, donde la fuerza del peso sería, instantánea y puntualmente, la resultante centrípeta.

Por lo general, es en esa parte que los estudiantes tienen dudas y no les convence la afirmación de que la fuerza normal sea nula en el punto más alto de la trayectoria (Simoni, 2018). Aparentemente, la dificul-

tad reside en no comprender que cuando es inminente la pérdida de contacto con la superficie, el cuerpo pueda completar la trayectoria circular sin “caer” con velocidad radial. Pueden así surgir discusiones en clase sobre la definición de fuerza normal y su comportamiento en movimientos circulares. Este trabajo propone profundizar la explicación del *loop* desde un punto de vista experimental, al discutir la elección de considerar como nula la fuerza normal sobre la esfera en lo alto de la trayectoria. Se propondrá una línea investigativa del problema, más allá de la aplicación del principio de conservación de la energía mecánica. Como sostiene Seré (2003), se mostrará que la experimentación puede actuar como una manera de contextualizar el enfoque teórico tradicionalmente enseñado en clase, guiado por abstracciones y lenguajes matemáticos.

II. MARCO TEÓRICO

Según Biembengut (2016), el término modelo, del latín *modelus*, tiene diferentes sentidos, pero en general, el más cercano al de representación, es el que significa algo que se pretende realizar, imitar, explicar y/o inferir. Dicha representación se transforma en una afirmación menos compleja que la realidad en que se basó, pero suficiente para aproximarla. Bunge (1974) afirma que solo los modelos construidos racionalmente y sometidos a una prueba experimental tienen suceso y, sobretodo, pueden ser corregidos de acuerdo a la necesidad.

Con seguridad, se debe esperar el fracaso de un modelo muy simplificado, pero todo el trabajo de una idea puede ser instructivo para la ciencia, porque puede sugerir que modificaciones serán necesarias para obtener modelos más realistas. Resumiendo, para captar lo real comience alejándose de la información. Introduzca después elementos imaginarios (o hipotéticos), pero con una intención realista. Construye así un modelo más o menos esquemático el que, para dar sus frutos deba ser confrontado con hechos. (Bunge, 1974, pp. 15-16, traducción propia)

El valor de un modelo se basa en su utilidad, en su adecuación a los fenómenos observados y en la aplicación de los datos que conduzcan a una solución, resultado, producto o teoría (Biembengut, 2016, pp. 66). Sin embargo, la autora señala que en algunos casos un modelo puede simplificar o distorsionar los datos empíricos, por ejemplo, en las ciencias, donde su uso permite descripciones y explicaciones simplificadas y resumidas de las operaciones del sistema en que se encuentra la situación-problema. Es posible realizar actividades experimentales para verificar constantes físicas o el grado de viabilidad de los respectivos modelos con los valores de una experiencia, ya que esos modelos, en general, inducen variaciones que dependen de las condiciones adoptadas. Se entiende entonces el propósito de una actividad experimental basada en un modelo, ya que por medio de la experimentación se puede aprender más y mejor sobre el contexto y las líneas del fenómeno y el hecho observado. De esa forma,

...la actividad experimental facilita esta comprensión de una manera realista, en la medida en que percibimos y aprehendemos cómo esos mismos datos son 'apropiados' para las declaraciones descriptivas, y así nos permiten explicitarlos y expresarlos para extraer conclusiones y significados (Biembengut, 2016, pp. 92, traducción propia)

Publicaciones recientes en el área de la enseñanza de las ciencias han demostrado que las actividades experimentales son fundamentales para que los estudiantes den sentido a los conceptos inherentes al modelado didáctico-científico. (Heidemann y otros, 2012; 2018; Heidemann, 2015). Es posible, de esta manera, promover la evolución de las concepciones epistemológicas de los estudiantes, a fin de permitir la comprensión de los propósitos relacionados a la adopción de modelos, al construir representaciones simplificadas. Se entiende entonces, uno de los roles de las actividades experimentales en la Enseñanza de la Física, además de la importancia de plantear, junto a los estudiantes, discusiones sobre las ocasiones y condiciones al adoptar modelos.

En este texto, se propondrá problematizar el enfoque teórico del problema del *loop* que se resuelve comúnmente en clase, para señalar en qué medida su solución tradicional se basa en propuestas típicas del modelado científico, que generalmente no son explicadas ni discutidas. En esta dirección, se considerará un enfoque experimental del fenómeno para hacer factibles los análisis, profundizar algunas de las conclusiones y cuestionar la idoneidad de los modelos para la resolución teórica del problema.

III. METODOLOGÍA

Este trabajo es parte de uno de los proyectos de investigación actuales del laboratorio *online* Mecánica Experimental con Imágenes (MEXI, disponible en <http://fep.if.usp.br/~fisfoto>), que es una página web sobre actividades experimentales dirigidas a la enseñanza de la Mecánica Clásica para estudiantes de grado de Física. Los experimentos se basan en la filmación de objetos cuyo movimiento se filma junto a algún instrumento que permite la medición de sus posiciones. Del video se extraen los cuadros individuales a los que se les inserta el “código de tiempo” (que sirve como cronómetro), para que las imágenes obtenidas permitan el estudio de los movimientos en cuestión. El análisis de los experimentos se realiza usando hojas de cálculo, para su agilización (Fonseca y otros, 2013).

Para este caso, se filmó un aparato que consistía en una pista de aluminio conformando un plano inclinado a 45° seguido del *loop* (figura 1a), hecho de un paralelepípedo rectangular de aluminio de radio $R = 14,5(2)$ cm, y una pequeña esfera homogénea de radio $r = 0,8705(5)$ cm y masa $m = 24,8(1)$ g. Alrededor de la trayectoria circular del *loop*, se adhirió un transportador cuya menor escala era de $0,5^\circ$, que permitió medir la posición angular de la esfera (figura 1b).

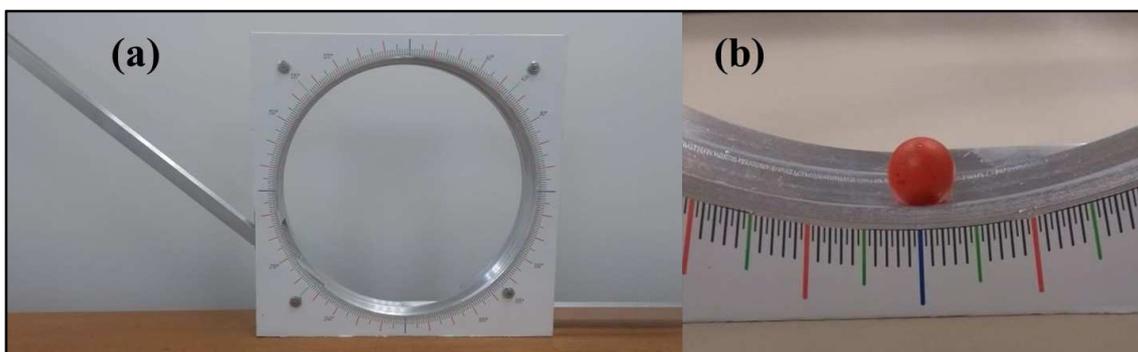


FIGURA 1. Imágenes del aparato experimental. (a) Vista completa del *loop* y la pista de acceso; (b) imagen ampliada donde se observa la escala graduada y la esfera.

El aparato fue iluminado para mejorar la visualización de las imágenes. Los videos fueron grabados con una cámara de alta velocidad, Sony Nex-FS700NK. Las imágenes se obtuvieron de filmaciones a 480 fps (cuadros por segundo). La separación y tratamiento de las imágenes de los videos y la inserción del código de tiempo se hizo con los softwares *Edius Pro 7* y *WolframMathematica 12*, respectivamente. La cámara se posicionó de forma perpendicular al plano vertical de la trayectoria, de modo que el centro del campo de filmación coincidió con el centro de su circunferencia. Esto solo fue posible con la ayuda de cuatro hilos de nylon colocados al frente y por detrás del bloque de aluminio, que coincidían con dos de sus diámetros. Cuando se observaban solamente dos hilos (los de atrás quedaban ocultos por los del frente), significaba que la cámara estaba centrada. Esto fue realizado con la intención de minimizar errores de paralaje. La Figura 2 muestra una imagen obtenida después del filmado y tratamiento. En ella se observa la esferita roja, en una posición de aproximadamente $40,0^\circ$. La x blanca difusa en el centro de la imagen es la que caracteriza del correcto posicionamiento de la filmadora.

Los videos se obtuvieron al abandonar la esfera desde cierta altura para conseguir que, en la parte más alta de *loop*, el valor de la fuerza normal fuese próximo de cero. Las medidas de tiempo y posición angular fueron cargadas en planillas de cálculo para calcular la velocidad angular instantánea, que se computó a partir del método de derivación numérica, es decir, la velocidad angular instantánea en el instante t_i se asumió como siendo la velocidad angular media en el intervalo de tiempo $t_{i-1} < t < t_{i+1}$. De esa forma,

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

donde θ es la posición angular e i el número de la imagen de un cierto conjunto de imágenes.

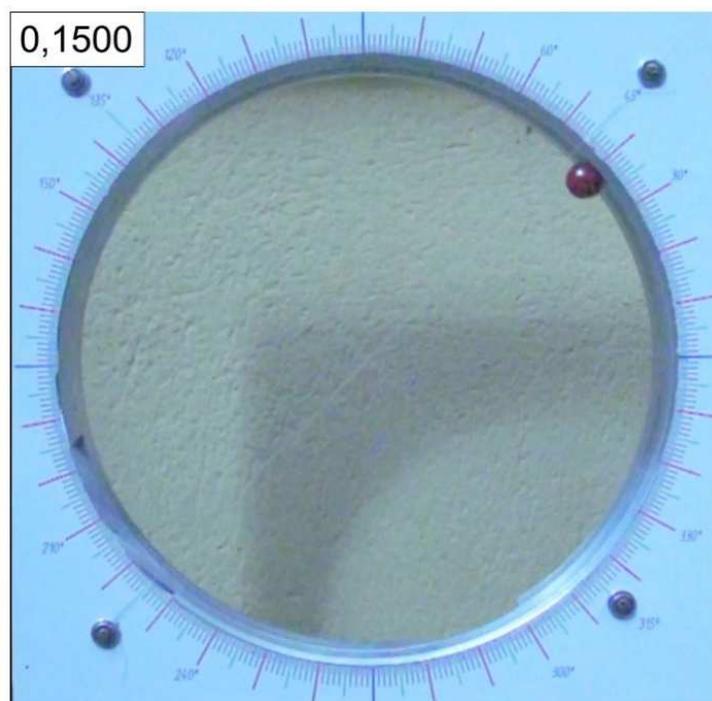


FIGURA 2. Imagen obtenida de un video. El rectángulo de la esquina superior izquierda representa el código de tiempo (en segundos).

Con los valores de velocidad angular en función del tiempo, fue posible determinar las intensidades de cada una de las fuerzas que actúan sobre la esfera a lo largo de su trayectoria. Las siguientes ecuaciones resumen los cálculos, considerando la fuerza centrípeta resultante con dirección radial y sentido negativo para dentro del círculo:

$$R_{cp}(t_i) = -m \cdot [\omega(t_i)]^2 \cdot R \quad (2)$$

$$P_{radial}(t_i) = -m \cdot g \cdot \text{sen}[\theta(t_i)] \quad (3)$$

$$N(t_i) = R_{cp}(t_i) - P_{radial}(t_i) \quad (4)$$

donde R_{cp} es la fuerza centrípeta resultante, P_{radial} la componente de la fuerza peso en dirección radial, g el módulo de la aceleración local de la gravedad, N la fuerza normal que actúa sobre la esfera que es la reacción de la compresión que ella hace sobre la pista, y finalmente m y R anteriormente informados.

IV. DATOS Y RESULTADOS

Los valores experimentales de las fuerzas en la dirección radial en función de la posición angular de la esfera, para una vuelta completa del *loop*, son mostrados en el gráfico de la figura 3. El sistema de referencia fue el tradicional, esto es, su dirección es radial con signo positivo para afuera. De esta manera esas fuerzas, al apuntar hacia el centro de la circunferencia son negativas. Es importante tener en cuenta que, incluso con la alta precisión alcanzada en el punto donde se abandona la esfera en la rampa de acceso, el valor encontrado para la fuerza normal en el punto más alto del *loop* no fue nulo, ni siquiera considerando la incertidumbre asociada. Sin embargo, el comportamiento de la intensidad de la fuerza normal es tal que, en el punto más alto de la trayectoria, es próximo a cero.

Fueron realizadas varias filmaciones con la esperanza de lograr un valor para la fuerza normal compatible con cero en el punto de mayor altura del *loop*, pero no tuvimos éxito. La menor intensidad experimental encontrada es la descrita en la figura 3. Aun así, fue posible esbozar una comprensión global de la dinámica del movimiento.

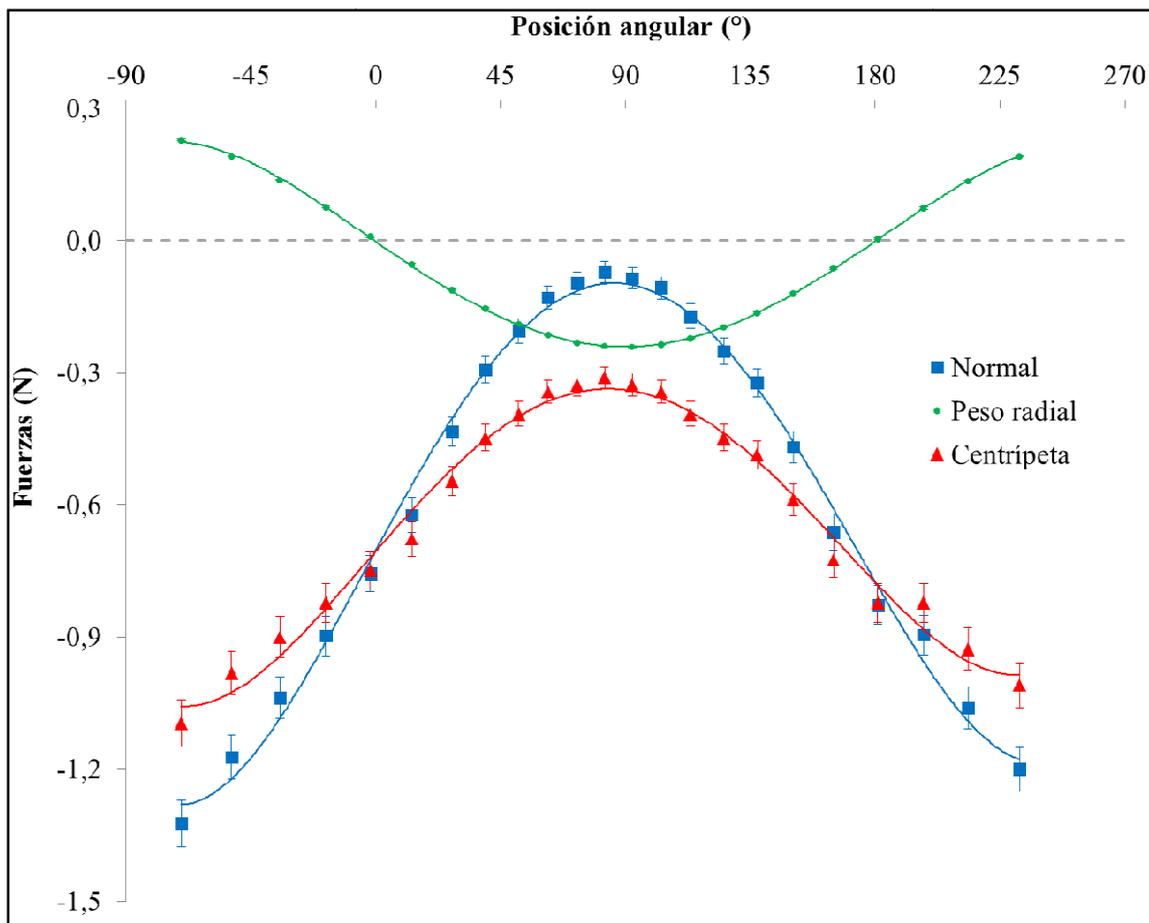


FIGURA 3. Valores de las fuerzas Peso, Normal y Centrípeta en función de la posición angular. Las líneas ajustadas a los puntos sirven solo para facilitar la identificación de cada conjunto. Las barras de incertidumbre de la fuerza peso en la dirección radial no aparecen claramente, ya que son más pequeñas que las marcas de los puntos experimentales.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se abordó una experiencia online cuya construcción se inspiró en los problemas clásicos de los libros de texto del *loop*, a partir de la crítica al hecho de que la supuesta anulación de la fuerza normal en el punto más alto de la trayectoria se trate como una estrategia de resolución de problemas en lugar de ser vista como resultado de un límite matemático derivado de un fenómeno modelado. Ante tal inquietud, se realizó una investigación que buscaba obtener la altura mínima ideal para completar el *loop*, donde se esperaba que la fuerza normal fuese nula en la parte superior de la trayectoria. Sin embargo, todavía no hemos obtenido experimentalmente ese valor y la pregunta sigue siendo: *¿en condiciones ideales, es realmente posible obtener un valor nulo para ella?*

Quizás, afirmar que la fuerza normal es nula en la parte superior de la trayectoria sea una declaración un tanto audaz, dadas las dificultades de obtener experimentalmente un escenario de resultados coherente con dicho discurso. Lo más curioso es que esta suposición generalmente se aborda en los libros de texto como una estrategia para resolver el problema teórico del *loop*, sin advertir, ni explicar adecuadamente, que se trata un modelo con un propósito simplificador. Los modelos científicos se presentan ampliamente en los libros de texto como hechos estáticos (Custódio, 2004), y este caso no es diferente. Al contrario, el principal argumento que existe para resolver el problema es que, al usar el Principio de Conservación de Energía, se obtiene economía cognitiva al determinar la altura mínima, porque solo se requiere una cierta habilidad para realizar los cálculos, en comparación con otras formas de resolución (Custódio, 2004). Entonces, al final, parece que el único objetivo es resolver el problema, el cual, si se consuma, revela una profunda deficiencia en las motivaciones y causas para incluir dicho asunto en la selección de problemas de dinámica. Profundizando el argumento, uno puede extender esta investigación para la enseñanza de la mecánica, la enseñanza de la física e incluso la enseñanza de las ciencias: *¿Cuáles motivaciones han sido asociadas a la resolución de problemas de Física en los libros didácticos, y hasta en el contexto de la sala de aula?*

Por lo tanto, se propone que simplemente resolver el problema no sea el único objetivo didáctico, de modo que cuando surjan dudas sobre este tema, los profesores puedan plantear la discusión y tengan herramientas convincentes y científicamente honestas para que los estudiantes se enriquezcan con los conceptos de fuerza de contacto y los modelos en física, además de comprender la existencia de un razonamiento basado en un límite matemático detrás de ciertas afirmaciones. El experimento realizado en este trabajo, utilizando una situación física real, tiene el potencial de ser configurado como una de estas herramientas.

El grupo tiene la intención de continuar investigando este tema al ser aplicado en cursos de graduación de física clásica y analizar las producciones de los alumnos en el proceso de aprendizaje y desarrollo conceptual vinculado al problema del *loop*, especialmente con respecto al comportamiento de las fuerzas a lo largo del movimiento. En futuras investigaciones se espera mejorar la técnica de abandono de la esfera sobre el plano inclinado y verificar el balance de energías de ese experimento, considerando la rotación de la esfera y la posibilidad que, en ciertos trechos, ruede con deslizamiento.

AGRADECIMIENTOS

A la Pró-Rectoría de Graduación de la Universidad de São Paulo (USP), por la concesión de la beca del Programa Unificado de Bolsas (PUB), al Laboratorio de Demonstraciones, a Roberto Lima y a los empleados del taller mecánico del Instituto de Física (IF-USP) por el diseño y 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 19/11569-0.

REFERENCIAS

- Biembengut, M. S. (2016). *Modelagem na educação matemática e na ciência*. São Paulo: Livraria da Física.
- Bunge, M. (1974). *Teoria e Realidade*. São Paulo: Perspectiva.
- Calçada, C. S. V. y Sampaio, J. L. P. (2005). *Física*. São Paulo: Editora São Paulo.
- Custódio, J. F. y Pietrocola, M. (2004). Princípios nas Ciências empíricas e o seu tratamento em livros didáticos. *Ciência & Educação*, 10(3), 383-399.
- Fonseca, M., Maidana, N. L., Severino, E. Z. G., Barros, S. F., Senhora, G. G. M. y 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.
- Halliday, D., Resnick, R. y Walker, J. (2008). *Fundamentos de Física*. Rio de Janeiro: LTC.
- Heidemann, L. A., Araújo, I. S. y Veit, E. A. (2012). Ciclos de Modelagem: uma alternativa para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(Especial 2), 965-1007.
- Heidemann, L. A., Araújo, I. S. y Veit, E. A. (2018). Dificuldades e avanços no domínio do campo conceitual da modelagem didático-científica: um estudo de caso em uma disciplina de física experimental. *Investigações em Ensino de Ciências*, 23(2), 352-382.
- Heidemann, L. A. (2015). *Ressignificação das atividades experimentais no ensino de Física por meio do enfoque no processo de modelagem científica*. 298 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Séré, M., Coelho, S. M. y Nunes, A. D. (2003). O papel da experimentação no ensino da física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(1).
- Simoni, F. (2018). Velocidade mínima para completar um *loop* circular vertical: uma abordagem cinemática. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(3), e3301.