

# La variación de la energía mecánica desde una TDIC

Variation in the mechanical energy from the perspective of a ICDT

REVISTA  
DE  
ENSEÑANZA  
DE LA  
FÍSICA

Marcos de L. Leite<sup>1,2</sup>, Vito R. Vanin<sup>2</sup>, y Nora L. Maidana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo.

<sup>2</sup>Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1371 – CEP 05508-090 – São Paulo, SP, Brasil.

E-mail: marcos.lima.leite@usp.br

## Resumen

Este trabajo expone una propuesta de experiencia inspirada en la epistemología de Gastón Bachelard para un fenómeno en el que no se conserva la energía, usando tecnologías digitales de la información y la comunicación (TDIC). La metodología del experimento consiste en determinar las energías cinética, potencial gravitacional y mecánica en función del tiempo y los trabajos de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo estudiado. Con esos valores, se hace posible validar, por medio del análisis estadístico, que el trabajo de fuerzas disipadoras es compatible con la variación de la energía mecánica. También se discuten posibles estrategias didácticas para el uso de esta actividad en el aula.

**Palabras clave:** Enseñanza de la mecánica; Actividades experimentales; Variación de la energía mecánica.

## Abstract

In this work, we propose an experiment inspired on Gaston Bachelard's epistemology about a phenomenon in which the energy does not conserve, using information and communication digital technologies (ICDT). The workflow inherent to the experiment allows the determination of the kinetic, gravitational potential and mechanical energies as functions of time and the works of the forces that act on the studied body. With these values, it is possible to perform a statistical analysis and show that the work of the dissipative forces is compatible with the change of the mechanical energy. Possible didactic strategies applying this activity in the classroom are also discussed.

**Keywords:** Mechanics teaching; Experimental activities; Variation of the mechanical energy.

## I. INTRODUCCIÓN

Al problematizar la experimentación en la enseñanza de la física, diversas publicaciones apuntan a distorsiones o ausencia de aportes teóricos (epistemológicos) que basen o que den soporte a hipótesis iniciales, al enunciado de los objetivos y a la continuación de los trabajos (Hodson, 1990; Thomaz, 2000; Wesendonk y Terrazzan, 2016). A pesar de ello, parece haber consenso sobre la importancia atribuida a las actividades experimentales en la enseñanza, sea por la comprensión de que la física es una ciencia eminentemente experimental, como por la idea de que una didáctica apenas teórica y muchas veces idealista es insuficiente para alcanzar la esencia de la actividad científica y la complejidad del mundo natural.

Bajo este contexto, la página web Mecánica Experimental con Imágenes (MEXI, antiguo Laboratorio Virtual de Mecánica, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto/>>) surgió hace aproximadamente una década y media en el Instituto de Física de la Universidad de São Paulo, con el objetivo de producir experiencias de mecánica y permitir realizarlas a partir del análisis de imágenes extraídas de filmaciones, constituyendo una iniciativa que combina actividades experimentales con tecnologías digitales de información y comunicación (TDIC). La metodología de trabajo (desde la creación de los aparatos experimentales hasta que las actividades estén disponibles en la página) ha sido siempre análoga, conforme presentado en publicaciones del grupo (Fonseca y otros, 2013; Fonseca y Maidana, 2015; Leite y otros, 2015; Maidana y otros, 2016a; 2016b). En ellas se relatan que cuerpos en movimiento son filmados junto a un instrumento de medida de posición, y a cada una de las imágenes (provenientes de los cuadros extraídos de los videos) es adicionado un código de tiempo, que corresponde al instante de tiempo del evento. Con los valores de

posición del objeto y tiempo observados en las imágenes puede ser construida una tabla y a partir de esos valores, determinar cantidades derivadas como velocidad, aceleración, fuerza, cantidad de movimiento y energía, para analizar la evolución dinámica del sistema en estudio. Los requisitos para trabajar con las experiencias del MEXI son computadores con hojas de cálculo y acceso a internet. Todos los detalles de las experiencias, la forma como fueron construidas, las imágenes y videos, así como las guías sugeridas para su uso en sala de aula, están disponibles en dicha página. Los experimentos online de MEXI vienen siendo usados en cursos de física de nivel medio y superior, tanto en disciplinas básicas como avanzadas de mecánica.

Wesendonk y Terrazzan (2016) clasifican los experimentos en tres modalidades básicas: a) con aparato físico, b) de pensamiento y c) simulación computacional. En la modalidad a) son apuntados cuatro tipos: demostración experimental, prevé-realiza-explica, verificación experimental y resolución experimental de un problema dentro de la realidad del alumno. Con respecto a las simulaciones, los autores concluyen que estas: i) son más adecuadas para experimentos que requieren laboratorios bien equipados y de alto costo, son de difícil ejecución o poseen un peligro inminente; ii) permiten claridad para visualizar los resultados, que muchas variables sean manipuladas y que la observación del fenómeno sea repetida diversas veces; y, iii) posibilitan que el alumno altere varios parámetros, explorando la situación física para verificar como esos cambios influyen en el fenómeno. Por lo expuesto, por más que las actividades del MEXI pertenezcan a la modalidad de experimentos con aparato físico y a los tipos prevé-realiza-explica y verificación experimental, su uso de manera coordinada con las TDIC permite incorporar muchas de las características asociadas a las simulaciones computacionales. En algunos experimentos, inclusive, los alumnos son desafiados y orientados a desenvolver sus propias simulaciones, con el auxilio de un software de hoja de cálculo, tomando como base modelos teóricos de la mecánica clásica.

Este trabajo presenta la propuesta de una actividad experimental inspirada en la epistemología de Gastón Bachelard (1978; 2004; 2008), que combina el uso de las TDIC abordando una situación-problema poco común e intrigante, más próxima a la realidad de los estudiantes, donde la energía mecánica (magnitud física central del análisis) no se conserva con el pasar del tiempo.

## II. MARCO TEÓRICO

Bachelard (1978) afirma que la ciencia, como emprendimiento humano, es construida a partir de una filosofía de dos polos, el empirismo y el racionalismo. En ese sentido, observando la alternancia del *a priori* y del *a posteriori*, sus concepciones convergen con la idea que el pensamiento científico pertenece a un campo intermediario entre la teoría y la práctica, entre la matemática y la experiencia. Bachelard expresa que la ciencia precisa abandonar su dominio de base para convencer plenamente: “*si ella experimenta, tendrá que razonar; si razona, tendrá que experimentar*” (Bachelard, 2008, p. 9, traducción propia). En ese sentido, “*conocer científicamente una ley natural significa conocerla simultáneamente como fenómeno y como número*” (Bachelard, 1978, p. 5, traducción propia). Para la filosofía tradicional, diversas posturas se presentan como opuestas y dan origen a dualidades, como realismo e idealismo, empirismo y racionalismo, sensualismo y espiritualismo. La obra de Bachelard no critica una u otra concepción, pero sí su radicalización; cualquier doctrina tomada como absoluta entraría en contradicción con el aspecto dinámico de la ciencia, que es lo que le asigna su característica más profunda. A medida en que se hace necesaria la comprensión del empirismo, lo hace también la aplicación del racionalismo, de modo que no se puede partir de una actitud filosófica general para juzgar el pensamiento científico (Bachelard, 2008).

Por lo expuesto, cabe pensar que una iniciativa de transposición de la epistemología bachelardiana como base filosófica para la enseñanza de la física implica necesariamente la elaboración de enfoques didácticos que proclamen la alternancia entre los polos empirista y racionalista. Solo las enseñanzas de una ciencia pragmática y experimental o de cuño propedéutico y teórico no podrían contemplar el pensar y el hacer científico. Además, cuando esta alternancia implica, por ejemplo, la realización de experimentos, se vuelve un requisito epistemológico considerar la naturaleza aproximada de los conocimientos científicos. Así, Bachelard (2004) diferencia los procesos cualitativos y cuantitativos y las iniciativas de verificación y validación:

*...en el primer momento, la verificación es puramente cualitativa. Se trata más de reconocer que de conocer, encontrar una señal más que analizar su significado. [...] En el fondo, la calidad es un punto de vista mientras no se haga el esfuerzo metafórico que la cuantifica. [...] Pero, desde el momento en que se dirige la verificación hacia el plano de la medida, de la ubicación exacta (y éste es el sentido final de toda verificación exacta), se está condenado a una verificación aproximada. A partir de ahí, la validación y la verificación dejan de ser sinónimos. Nuestro conocimiento todavía es válido para fines específicos, pero ya no puede ser rigurosamente comprobado; en términos absolutos, el ya no es verificable, pues la experiencia minuciosa hace que las aberraciones sean cada vez más sensibles. La verificación sólo vale, por lo tanto, dentro de los lími-*

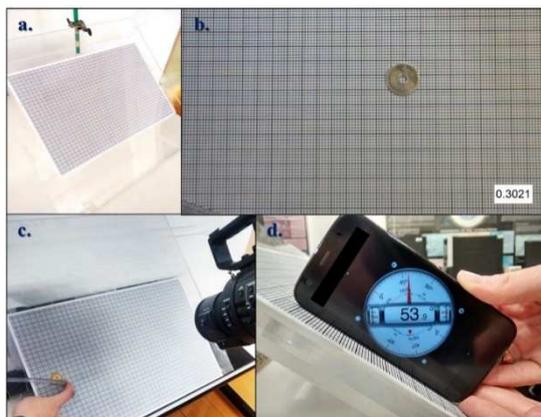
tes que un juicio auxiliar de verificación debe fijar. (p. 274, traducción propia)

En la mecánica clásica, los sistemas y las fuerzas son clasificados como conservativos o no conservativos a partir del análisis de la conservación de la energía, donde se deducen ciertos principios relacionados a la energía mecánica. En el contexto de la enseñanza de la física, predominan tanto el tratamiento teórico de los contenidos como el análisis de situaciones-problema para los cuales la energía se conserva, sin embargo, este trabajo intentará presentarse bajo bases diferentes. Se expondrá una alternativa de actividad experimental en que se analiza un sistema no conservativo, con la intención de explorar la disipación de la energía de forma cualitativa y cuantitativa, mostrando que la variación de la energía mecánica de un sistema corresponde al trabajo de las fuerzas no conservativas que actúan sobre él. Para ello, partiremos de un punto de vista de inspiración bachelardiana, alternando actividades con iniciativas empiristas y racionalistas, con la intención de mostrar que cuantitativamente es posible sólo validar (y no verificar de forma absoluta) la relación entre el trabajo de fuerzas disipadoras y la variación de la energía mecánica.

### III. EL APARATO EXPERIMENTAL

Para analizar las medidas que permitieron calcular los trabajos de las fuerzas y las energías, se aprovechó una experiencia ya existente en el MEXI, la de Fuerza de Rozamiento Variable, disponible en la página <<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/planoInclinado/>>. En ella, el fenómeno estudiado es el lanzamiento oblicuo de un cuerpo sobre la superficie de un plano inclinado, donde la fuerza de fricción no puede ser ignorada. El montaje del plano inclinado consistió en una placa de acrílico espesa, sujeta a un soporte universal con una mufla. Sobre dicha placa fue fijado un papel cuadriculado, que permitió tomar los valores de posición a partir de las imágenes obtenidas del video grabado (figura 1a). Una moneda perforada fue lanzada sobre el plano con ayuda de una regla flexible (figura 1b y 1c). En algunos videos fue usada una placa fina y transparente de acrílico colocada sobre el papel cuadriculado para trabajar con diversos coeficientes de fricción. Varios videos fueron grabados con diferentes valores de inclinación del plano, medidos con un inclinómetro (figura 1d).

Los videos se obtuvieron con una cámara Sony Nex-FS700RH, que trabaja con una tasa de captura de hasta 960 fps (fotogramas por segundo). De los videos, se obtuvieron los cuadros e hicieron ajustes de color, brillo y contraste con la ayuda del software *EdiusPro 7*. Una vez conocidas las tasas de filmación, en cada cuadro fue incluido, con el software *Wolfram Mathematica 12*, un código de tiempo, especie de cronómetro, que permitió asociar las posiciones ocupadas por la moneda en cada instante de tiempo. De cada filmación, se obtienen generalmente muchas decenas o incluso algunas centenas de imágenes, que se subdividen en conjuntos, espaciadas en el tiempo con igual  $\Delta t$ . El material de la experiencia de fuerza de rozamiento variable del MEXI posee varios conjuntos de imágenes (para diferentes superficies de contacto y ángulos de inclinación del plano), videos e imágenes del aparato experimental y guías de trabajo para realizar la experiencia. Esta propuesta usa, inicialmente, la primera de las guías, que está disponible en la página web ya mencionada. La actividad de determinación de los trabajos y energías, para la cual todavía no hemos desarrollado la guía de trabajo, será presentada a continuación.



**FIGURA 1.** Aparato experimental: a) plano inclinado preso al soporte universal; b) imagen extraída de un video, a la cual fue incorporado el código de tiempo, en segundos; c) filmadora posicionada con su eje longitudinal, de forma perpendicular al plano inclinado; d) dispositivo que mide la inclinación, posicionado sobre el plano inclinado.

#### IV. PROPUESTA DE ACTIVIDAD

Pretendemos usar la primera guía del experimento Fuerza de Rozamiento Variable que orienta a medir la posición de la moneda en las diferentes imágenes del conjunto de datos asignado a cada grupo de estudiantes. Para ello se deben seguir los siguientes pasos: i) elegir un sistema de referencia  $Oxy$ , con  $Ox$  orientado positivamente para la derecha y  $Oy$  para arriba, en la intersección de dos líneas (figura 1b); ii) leer las posiciones  $x(t_i)$  e  $y(t_i)$  del centro de la moneda en cada instante de tiempo  $t_i$ , siendo  $i$  un número entero, de 1 a  $n$ , que identifica cada una de las  $n$  imágenes de un cierto conjunto e introducir esos valores en una hoja de cálculos; para, iii) derivar numéricamente las componentes de la velocidad  $v(t_i)$  en ambas direcciones, a partir de las posiciones y tiempos medidos, y obtener bajo el mismo concepto de derivación numérica la aceleración  $a(t_i)$  a partir de las velocidades y tiempos; y finalmente, iv) determinar, desde de las ecuaciones de movimiento para ambas direcciones del movimiento, las proyecciones de las fuerzas peso, de fricción y resultante en función del tiempo, conocido el ángulo  $\theta$  de inclinación del plano y la masa  $m$  de la moneda. El detalle de esas etapas (que incluye ecuaciones, convenciones y diagramas de fuerza) no será dado aquí, ya que está disponible en la página mencionada en la sección anterior y se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo.

Una vez conocidas esas magnitudes, las energías: cinética ( $K$ ), potencial gravitacional ( $U$ ) y mecánica ( $E$ ) en función del tiempo, pueden ser calculadas con:

$$K(t_i) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot [v(t_i)]^2 \quad (1)$$

$$U(t_i) = m \cdot g \cdot y(t_i) \cdot \text{sen } \theta \quad (2)$$

$$E(t_i) = K(t_i) + U(t_i) \quad (3)$$

donde  $g$  es la aceleración gravitacional local.

La actividad proporciona también una etapa interesante al solicitar que los alumnos propaguen las incertidumbres para los valores de energía. Los desvíos estándar de la masa, de la aceleración gravitacional y del ángulo de inclinación del plano pueden ser ignorados y el de la energía potencial gravitacional depende apenas del de posición, mientras que la de la energía cinética es proporcional al módulo de la velocidad, ya que es un factor elevado al cuadrado. De esta manera, la propagación incluye incertidumbres constantes y variables, y los estudiantes necesitan tomar cuidado especial al trabajar con una hoja de cálculos.

La dirección e intensidad de las fuerzas peso y normal son constantes, pero, las proyecciones de las fuerzas de rozamiento y resultante sobre el plano de movimiento son variables. La metodología de cálculo permite obtener las fuerzas de rozamiento y resultante para pequeños desplazamientos, dentro de los cuales pueden ser consideradas aproximadamente constantes. Así, el trabajo  $\Delta W_F$  de la fuerza  $\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j}$  en el desplazamiento  $\Delta \vec{r} = \Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j}$  es:

$$\Delta W_F = F_x \cdot \Delta x + F_y \cdot \Delta y \quad (4)$$

Suponiendo que para cada intervalo de tiempo correspondiente a tres instantes  $t_i$  consecutivos disponibles en la hoja de cálculo construida, las proyecciones de las fuerzas sean constantes e iguales a la media de los valores para estos tres instantes, se pueden calcular los trabajos de las fuerzas para pequeños desplazamientos usando la ecuación (4), partiendo de los valores de sus proyecciones ( $F_x$ ,  $F_y$ ) y de las posiciones ( $x$ ,  $y$ ) ocupadas por la moneda. Este método aproximado está expuesto en la tabla I, donde la fuerza  $F$  indicada corresponde a cualquier fuerza (peso, de fricción o resultante) para la cual se desea calcular el respectivo trabajo en el desplazamiento obtenido de los valores de posición medidos.

**TABLA I.** Modelo de tabla para el cálculo del trabajo de una fuerza. Las celdas sombreadas corresponden a valores de fuerza que son desconocidos, como consecuencia del método de derivación numérica usado en los cálculos de velocidades y aceleraciones, de la primera guía de trabajo de la experiencia.

$t$	$x$	$y$	$F_x$	$F_y$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\bar{F}_x$	$\bar{F}_y$	$\Delta W_F$
$t_1$	$x_1$	$y_1$							
$t_2$	$x_2$	$y_2$							
$t_3$	$x_3$	$y_3$	$F_{x3}$	$F_{y3}$	$\Delta x_{35} = x_5 - x_3$	$\Delta y_{35} = y_5 - y_3$	$\bar{F}_{x35} = \frac{F_{x3} + F_{x4} + F_{x5}}{3}$	$\bar{F}_{y35} = \frac{F_{y3} + F_{y4} + F_{y5}}{3}$	$\bar{F}_{x35}\Delta x_{35} + \bar{F}_{y35}\Delta y_{35}$
$t_4$	$x_4$	$y_4$	$F_{x4}$	$F_{y4}$					
$t_5$	$x_5$	$y_5$	$F_{x5}$	$F_{y5}$	$\Delta x_{57} = x_7 - x_5$	$\Delta y_{57} = y_7 - y_5$	$\bar{F}_{x57} = \frac{F_{x5} + F_{x6} + F_{x7}}{3}$	$\bar{F}_{y57} = \frac{F_{y5} + F_{y6} + F_{y7}}{3}$	$\bar{F}_{x57}\Delta x_{57} + \bar{F}_{y57}\Delta y_{57}$
$t_6$	$x_6$	$y_6$	$F_{x6}$	$F_{y6}$					
$t_7$	$x_7$	$y_7$	$F_{x7}$	$F_{y7}$	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

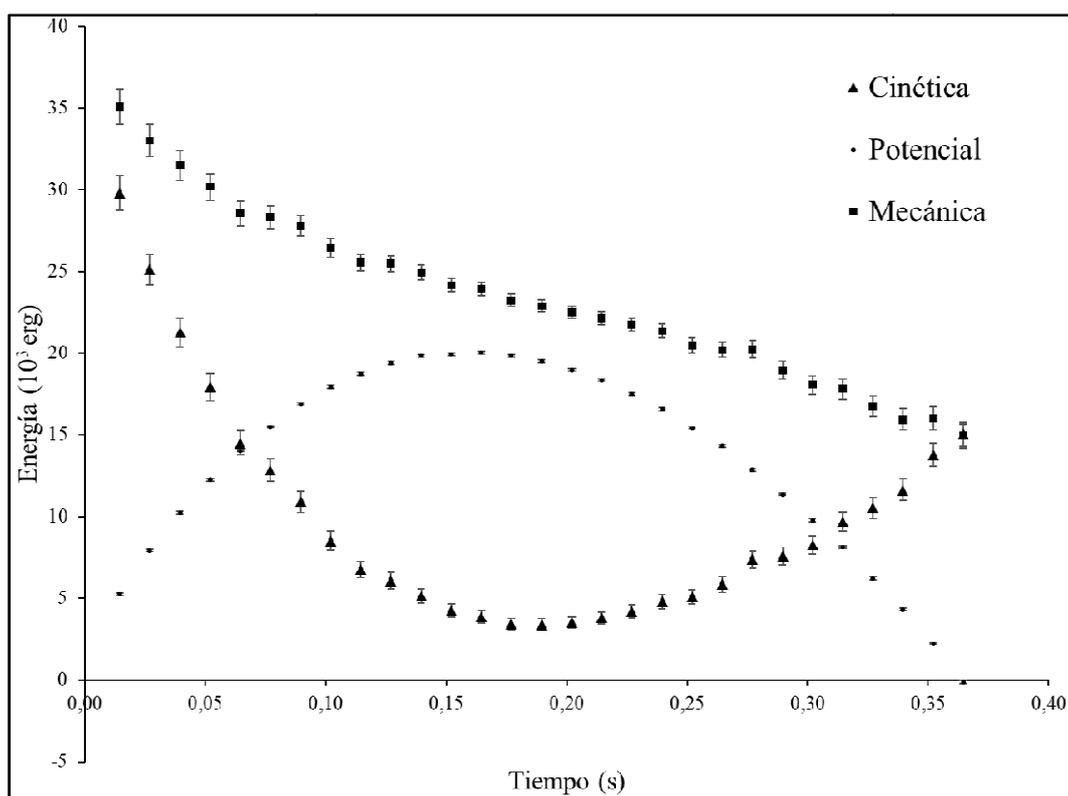
Al proponer este método de cálculo de trabajo a un estudiante, se debe llamar la atención sobre el hecho de que si el número de instantes para los cuales hay valores de fuerza no es impar (y mayor o igual que 3), sobrará una línea que no podrá ser usada para los cálculos de trabajo en la planilla, por ser imposible realizarlos a partir del método expuesto. Como se muestra en la ecuación (4), el cálculo del trabajo depende de cuatro magnitudes, las fuerzas medias y los desplazamientos en ambas direcciones. La incertidumbre en el desplazamiento depende de la incertidumbre en la posición, que es constante. Por su parte, la incertidumbre en la fuerza media depende de la incertidumbre en la proyección de la fuerza, que también es constante. A pesar de ello, la incertidumbre en el trabajo será variable, ya que el proceso de propagación la hace proporcional a todas las cuatro magnitudes citadas. Una vez conocidas esas incertidumbres, es posible, a partir de una suma, obtener los trabajos totales de cada fuerza y sus respectivos desvíos estándar durante el intervalo de tiempo en que se da el movimiento, excepto por algunos instantes iniciales y finales. Identificando los instantes inicial y final,  $t_i$  y  $t_f$ , respectivamente, para los cuales son conocidos los trabajos de las fuerzas, pueden ser determinadas las variaciones de las energías para el intervalo  $[t_i; t_f]$  y sus incertidumbres. De ese modo, es posible comparar las variaciones de las energías con los trabajos de las fuerzas y verificar, por ejemplo, vía test  $z$ , la compatibilidad entre:

- i. el trabajo de la fuerza peso y la variación de la energía potencial gravitacional, en módulo;
- ii. el trabajo de la fuerza resultante y la variación de la energía cinética;
- iii. el trabajo de la fuerza de fricción y la variación de la energía mecánica.

## V. RESULTADOS TÍPICOS Y POSIBILIDADES DIDÁCTICAS

### A. Balance de energías

La figura 2 muestra un gráfico con los valores de energías cinética, potencial gravitacional y mecánica obtenidas con las ecuaciones (1), (2) y (3) en función del tiempo, para el conjunto de imágenes *CI.1* disponible en el MEXI para el experimento de fuerza de rozamiento variable. En ella se aprecia el comportamiento no conservativo del sistema analizado, con la pérdida de energía mecánica en función del tiempo debida a la acción de la fuerza de fricción.



**FIGURA 2.** Las marcas corresponden a los valores experimentales de las energías cinética, potencial gravitacional y mecánica de la moneda sobre el plano inclinado. Las barras de incertidumbre corresponden a un desvío estándar.

El gráfico de la figura 2 puede ser explorado didácticamente al solicitar que el estudiante interprete el comportamiento de cada una de las energías, justificando sus comentarios con base al análisis cualitativo de la dinámica del movimiento observado en los videos e imágenes del experimento. También puede ser pedida una estimativa de la potencia media de la fuerza de rozamiento –que se obtiene a partir del coeficiente angular de la recta decreciente ajustada a los valores de energía mecánica–, o investigaciones e hipótesis sobre el destino de la energía disipada.

Es común encontrar estudiantes en inicio de carrera que confunden las condiciones que un sistema precisa satisfacer para que su energía mecánica se conserve. Este experimento puede servir de ejemplo para esa internalización. Con las informaciones del gráfico de energía en función del tiempo, el profesor podría orientar a que sea definido como sistema el conjunto moneda-plano inclinado-Tierra, en este caso la fuerza de fricción es interna al sistema, pero como disipa energía, no se conserva la energía mecánica.

**B. Balance de los trabajos de las fuerzas**

La tabla II muestra el resultado para los trabajos de las fuerzas y las variaciones de energía para el caso del experimento mostrado en la figura 2. El trabajo total de cada fuerza fue calculado a partir de la suma del trabajo para pequeños desplazamientos, a partir de la ecuación(4). Las variaciones de energía fueron determinadas de la diferencia entre sus valores final e inicial, de acuerdo con las ecuaciones (1), (2) y (3), dentro del intervalo de tiempo para los cuales eran conocidos los trabajos de las fuerzas, ver la tabla I.

**TABLA II.** Resultados comparativos de trabajo de las fuerzas y las variaciones de energía para el caso experimental descrito en la figura 2.

Magnitud	Valor (10 <sup>3</sup> erg)	Factor z
Trabajo de la fuerza peso	+5,7 ± 0,6	0,02
Variación de la energía potencial	-5,69 ± 0,12	
Trabajo de la fuerza resultante	-11,7 ± 1,8	0,16
Variación de la energía cinética	-11,3 ± 1,2	
Trabajo de la fuerza de atrito	-17,4 ± 1,7	0,16
Variación de la energía mecánica	-17,0 ± 1,2	

Los tres pares de líneas de esta tabla, al analizarlos de acuerdo con el test  $z$ , permiten algunas conclusiones: (i) la definición de función energía potencial para una fuerza conservativa implica cierta identidad: el trabajo de esa fuerza corresponde, en módulo, a la variación de la energía potencial, diferenciándose apenas por el signo. Esa identidad es validada para el primer par de valores de la tabla II, con gran precisión; (ii) el trabajo de la fuerza resultante sobre un cuerpo corresponde a la variación de la energía cinética, conforme el teorema correspondiente. Los valores de esa tabla también permiten validar ese teorema, al analizar el segundo par de valores, dentro de un desvío estándar; y (iii) la conservación de la energía mecánica ocurre cuando todas las fuerzas que actúan sobre un sistema son conservativas. La no conservación se debe al trabajo de fuerzas disipadoras. Este principio también se muestra válido dentro de un desvío estándar, véase el último par de resultados.

## VI. APLICACIÓN DE LA ACTIVIDAD

La experiencia online de Fuerza de Rozamiento Variable ha sido aplicada a varias cohortes de licenciatura (profesorado) en física en disciplinas avanzadas de mecánica. La dinámica de trabajo se desarrolla generalmente en dos partes, de acuerdo con las guías de esa página web. En la primera parte, los alumnos obtienen los valores básicos de posición y tiempo y calculan las magnitudes derivadas, así como las fuerzas, lo que permite interpretar la mecánica del movimiento de la moneda. Una de las principales conclusiones cualitativas de los alumnos se refiere a la percepción de que la forma de la trayectoria de la moneda lanzada de forma oblicua, sobre el plano inclinado, no es una parábola, lo que se causa extrañeza. En la segunda parte de la experiencia online (no relatada aquí), se propone que los alumnos constaten la validez de las leyes empíricas del rozamiento de contacto por un análisis estadístico y usen un modelo teórico basado en esas leyes para prever la trayectoria de la moneda, a partir de un método de integración numérica. Esa experiencia ha sido propuesta a duplas o tríos de alumnos, y cada una de sus partes fue realizada en un plazo de dos a tres semanas (donde la segunda es solicitada después de la corrección de la primera parte, lo que evita conclusiones erradas en caso de que las medidas hayan sido tomadas sin la precisión adecuada).

En este trabajo se detalla una nueva posibilidad de análisis para la segunda parte de esa experiencia online, como una alternativa a la ya disponible en la página web, donde los trabajos de las fuerzas a lo largo del movimiento podrían ser correlacionados con las variaciones de energía. De hecho, dentro de las incertidumbres experimentales, el trabajo de las fuerzas no conservativas es compatible con la variación de la energía mecánica. Conclusiones como estas (generalmente presentadas en los cursos de mecánica de forma apenas teórica al resolver problemas clásicos), cuando obtenidas experimentalmente y dentro de intervalos de confianza tolerables, pueden contribuir para hacer esos episodios didácticos de los cursos de física menos autoritarios y mnemónicos. Por la epistemología bachelardiana, es posible percibir que el dinamismo de la ciencia no está preso a la cantidad ni confinado al mundo empírico, como normal y erróneamente se interpreta el papel de la experimentación. En esa dirección, el principio epistémico que guio la elaboración de esta propuesta fue la intención de crear un flujo de trabajo que alternase análisis cuantitativos y cualitativos y enfoques entre empíricos y racionales del problema estudiado. Como afirma Bachelard (2008), “*Las relaciones entre la teoría y la experiencia son tan estrechas que ningún método, sea experimental o racional, tiene la garantía de conservar su valor*” (p. 15, traducción propia).

## VII. CONCLUSIONES

El enfoque dado aquí a los teoremas sobre el principio general de conservación de la energía corrobora una perspectiva didáctica de cierta forma inusual en los cursos tradicionales de mecánica. Al final, la mayoría de las experiencias involucra la conservación de la energía mecánica, y no su disipación. Además, bajo una óptica bachelardiana, la validación experimental aproximada de un teorema (en contraposición a su absoluta verificación) es una iniciativa científicamente correcta y metodológicamente asertiva. Esta propuesta puede ser delineada en cuatro movimientos epistémicos básicos: i) se parte de un enfoque teórico tradicional de los teoremas de trabajo y energía, que inicialmente pasan a ser tratados como hipótesis a ser corroboradas; ii) se fomenta realizar un experimento online donde tales magnitudes pueden determinarse con precisión considerable; iii) se busca, a partir del test  $z$  de compatibilidad, la validación de las hipótesis enunciadas; y, iv) se confirman los teoremas que tratan del principio general de conservación de la energía a partir de la validez de tales hipótesis, donde se reconocen los límites aproximados de dicha confirmación. El camino, iniciado en un plano teórico, se traslada a una iniciativa experimental, y se basa en los resultados para retomar la teoría y constatar su validez, resulta ser fiel a la perspectiva bachelardiana de alternancia entre los polos empirista y racionalista, teniendo, por lo tanto, la

propiedad de brindar una muestra del dinamismo intrínseco del trabajo científico a los estudiantes. Y no deja de resaltar el carácter aproximado del conocimiento producido, ya que la validación de los principios se da desde una perspectiva estadística, que, a pesar de confiable, es inexacta.

Gran parte de los problemas clásicos y de los experimentos propuestos en cursos tradicionales de mecánica abordan la conservación de la energía mecánica. Esta experiencia propone un enfoque didáctico distinto al explorar un sistema real con rozamiento (donde la energía mecánica no es un invariante físico) como instrumento de reflexión y de validación de principios de la mecánica. Desde ese punto de vista, se puede afirmar que una actividad con tal dinámica puede colaborar incluso para postular con mayor complejidad los esquemas de formulación teórico-experimentales esperados para un curso de física. Se espera que este trabajo y las experiencias online de la página web MEXI puedan proporcionar material complementario para las prácticas experimentales en la formación de profesores de ciencias, y para inspirar a sus pares hacia un punto de partida epistemológico de concepción abierta y realización posible, como se buscó mostrar en este caso.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 y la FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) por la concesión del proyecto número 014/08206-0.

## REFERENCIAS

- Bachelard, Gaston. (1978). *A filosofia do não, O novo espírito científico, A poética do espaço*. São Paulo: Abril Cultural.
- Bachelard, Gaston. (2004). *Ensaio sobre o conhecimento aproximado*. Rio de Janeiro: Contraponto.
- Bachelard, Gaston (2008). *O Novo Espírito Científico*. Lisboa: Edições 70.
- Fonseca, M., Maidana, N. L., Severino, E., Barros, S., Senhora, G., 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. L. (2015). Evaluación de la experiencia virtual "giroscopio": procesos de razonamiento cognitivo de los alumnos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 27(extra), 453-461.
- Hodson, D. (1990). A critical look at practical work in school Science. *School Science Review*, 70(256),33-40.
- Leite, M. L., Maidana, N. L., Fonseca, M., Vanin, V. R. (2015). Innovaciones del Laboratorio Virtual: el experimento de colisiones bidimensionales. *Revista de Enseñanza de la Física*, 27(extra), 543-549.
- Maidana, N., Fonseca, M., Barros, S. F., Vanin, V. R. (2016a). The rolling with slipping experiment in the virtual physics laboratory - context-based teaching material. *PhysicsEducation*, 51, 045001 (10pp).
- Maidana, N., Fonseca, M., Leite, M. L., Bertelli, L. J., Vanin, V. R. (2016b). La velocidad relativa: nuevas contribuciones del laboratorio virtual. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28(extra),101-108.
- Thomaz, M. F. (2000). A experimentação e a formação de professores de ciências: uma reflexão. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 17(3),360-369.
- Wesendonk, F. S., Terrazzan, E. A. (2016). Caracterização dos focos de estudo da produção acadêmico-científica brasileira sobre experimentação no Ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(3),779-821.