

Un enfoque epistemológico para enseñar el concepto de energía en mecánica en cursos de Física Introductoria

Nicolás Gandolfo 

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. ngandolfo@unc.edu.ar

José Gutiérrez-Berraondo 

Escuela de Ingeniería Dual, IMH Campus, Elgoibar, España. jgutierrez@imh.eus

Paulo Sarriugarte 

Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), Bilbao, España. paulo.sarriugarte@ehu.eus

Laura Buteler 

Instituto de Física Enrique Gaviola, FAMAF - CONICET, Córdoba, Argentina. laura.buteler@unc.edu.ar

Jenaro Guisasola 

Escuela de Ingeniería Dual, IMH Campus, Elgoibar, España. jenaro.guisasola@ehu.eus

[Recibido: 8 agosto 2024, Revisado: 21 diciembre 2024, Aceptado: 21 febrero 2025]

Resumen: La energía es un concepto fundamental que permite la explicación y predicción de fenómenos en todos los campos de la física. Esto puede explicar que su comprensión se haya convertido en un objetivo de aprendizaje prioritario en los currículos de ciencias de numerosos países, y que su enseñanza y aprendizaje haya sido ampliamente investigada. Este artículo propone un enfoque epistemológico de enseñanza sobre la energía en el campo de la mecánica para estudiantes bachillerato y cursos introductorios de física universitaria. Este enfoque considera el conocimiento de la física como el resultado de un arduo proceso de resolución de problemas y de prueba rigurosa de las hipótesis iniciales y, está orientado a promover una actualización de la comprensión del concepto de energía. Este artículo justifica la utilidad del enfoque epistemológico e ilustra su aplicabilidad a la hora de definir objetivos de aprendizaje en cursos introductorios de física en mecánica newtoniana, que permitan una clarificación conceptual dentro de la compleja red de conceptos y niveles de interpretación asociados al concepto de energía.

Palabras clave: Enseñanza sobre energía; Mecánica newtoniana; Cursos introductorios de física.

An epistemological approach for teaching energy in Newtonian Mechanics in Introductory Physics courses

Abstract: Energy is a fundamental concept that allows the explanation and prediction of phenomena in all fields of physics. Its understanding is important for citizens to make informed decisions about socio-scientific problems. This may explain why understanding energy has become a priority learning objective in the science curricula of many countries, and why its teaching and learning have been the subject of extensive research. This article proposes an epistemic approach to teaching energy within the field of mechanics to students in introductory physics courses. This approach considers the knowledge in physics to be a result of an arduous process of problem solving and rigorous testing of initial hypotheses, and, is oriented to promote an updated understanding of the concept of energy. This article justifies the usefulness of the epistemological approach and illustrates its applicability when defining learning objectives in introductory physics courses in Newtonian mechanics that allow conceptual clarification within the complex network of concepts and levels of interpretation associated with the concept of energy.

Keywords: Teaching Energy; Newtonian Mechanics; Introductory Physics Courses.

Para citar este artículo: Gandolfo, N., Gutiérrez-Berraondo, J., Sarriguarte, P., Buteler, L. y Guisasola, J. (2025). Un enfoque epistemológico para enseñar el concepto de energía en mecánica en cursos de Física Introductoria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 22(1), 1301. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2025.v22.i1.1301

Introducción

En gran medida, la física estudia los acontecimientos, estudia el cambio, el cambio que ha ocurrido y el cambio que aún está por ocurrir. En este objetivo, la energía es un concepto fundamental que permite la explicación y predicción de fenómenos en todos los campos de la física (Ogborn, 1990). También es importante para la ciudadanía, su comprensión se encuentra en el centro de problemas socio científicos relacionados, entre otros, con el medio ambiente, la nutrición y el transporte de mercancías (UNESCO, 2017). Esto puede explicar que su comprensión se haya convertido en un objetivo de aprendizaje prioritario en los currículos de ciencias de numerosos países (Leaton et al., 2018; NGSS Lead States, 2013).

Sin embargo, el concepto de energía es uno de los más abstractos de la física, de difícil definición que requiere aclarar sus relaciones con ideas fundamentales como materia, interacción y cambio (Chabay et al., 2019; Hecht, 2019). Enseñar energía está lejos de ser obvio, y, a pesar de que se ha dedicado una cantidad considerable de investigación, su enseñanza es una cuestión compleja que sigue planteando importantes retos didácticos (ver por ejemplo, Bächtold y Guedj, 2013; Domènech et al., 2007; López-Simó y Couso, 2022; Neumann y Nordine, 2023). Esto puede ser debido a diferentes razones. En primer lugar, la energía es un concepto transversal a fenómenos de todas las ramas de la física y en diferentes contextos, lo que puede favorecer que el alumnado presente ideas compartimentadas y dificultades en la comprensión unificada del concepto. Si bien hay muchos estudios que muestran que el alumnado presenta concepciones alternativas que pueden dificultar el aprendizaje del concepto de energía (Tong et al., 2023), faltan avances sustanciales respecto a esfuerzos de clarificación conceptual sobre qué es la energía y cómo debería enseñarse en clase. En segundo lugar, el concepto de energía está incluido en una red conceptual muy compleja. Por un lado, se necesita diferenciar el concepto de otros relacionados como fuerza, cantidad de movimiento (momento lineal), trabajo y calor y, por otro, se necesita distinguir entre fuentes, formas, transformaciones y transferencia de energía. Frecuentemente, el alumnado muestra confusión entre conceptos y el papel de la energía en los cambios (Sabo et al., 2016; Trumper y Gorsky 1993; Soto et al. 2019; Domènech et al. 2023). Enseñanza sobre calor y temperatura en la educación secundaria.). En tercer lugar, comprender el principio de conservación de la energía (PCE) requiere tener un pensamiento sistémico, es decir, reconocer la necesidad de definir el constructo “sistema” y analizar cómo interactúa con su “entorno” (Chabay et al., 2019; Seeley et al., 2019). Esto implica comprender y aplicar los conceptos de transformación, transferencia y disipación de la energía (Solbes et al., 2009). La comprensión y aplicación del principio de conservación de la energía suele considerarse como el objetivo último del aprendizaje en el currículum de física en secundaria (Colonnese et al., 2012; Neumann y Nordine, 2023).

Este trabajo se distingue de los citados anteriormente, en el enfoque epistemológico que emplea para identificar y justificar los objetivos de aprendizaje, así como por el nivel educativo al que está dirigido. El análisis epistemológico facilita una comprensión científica de los objetivos propuestos en el currículo, pone de manifiesto las limitaciones de los modelos históricos y ayuda a evitar simplificaciones excesivas que dificulten una comprensión contemporánea (Ruthven et al., 2009). Además, como se observa en la bibliografía citada en el párrafo anterior, la gran mayoría de las investigaciones sobre enseñanza-aprendizaje de la energía se centran en la Enseñanza Secundaria Obligatoria

(12-16 años), siendo escasas las que abordan el nivel de bachillerato y el primer curso universitario (16-18 años) (Gutiérrez-Berraondo et al., 2022). Nuestro trabajo se centra en este nivel, limitándose al campo de la mecánica newtoniana y al tema de "Energía y Trabajo", que es la primera parte del currículo de física en la que se introduce el concepto de energía y su conservación. Más precisamente, las preguntas de investigación que se plantean en este estudio son:

¿En qué medida un enfoque epistemológico para la energía ayuda a definirla con precisión, pese a su complejidad? - ¿Cómo un enfoque epistemológico orienta la definición de los objetivos de enseñanza sobre la energía en cursos introductorios de física en el tema de "energía y trabajo" en mecánica newtoniana?

En el siguiente apartado abordamos la primera pregunta de investigación a través de un análisis epistemológico del concepto de energía, detallando sus sutilezas y su complejidad. En este estudio entendemos por análisis epistemológico, el análisis de los desarrollos históricos de la teoría teniendo en cuenta los argumentos de la práctica científica que condujeron a avances significativos hacia la teoría actual y que identifica los elementos claves del conocimiento científico de la teoría (Jiménez-Aleixandre y Crujeiras, 2017). La respuesta a la segunda pregunta de investigación se encuentra en el apartado "objetivos de aprendizaje para cursos introductorios de física", donde tratamos de establecer una transposición didáctica de las claves epistemológicas a los objetivos de aprendizaje del currículo de acuerdo con los nuevos planes de estudio en el tema de energía y trabajo para el nivel educativo de física introductoria. Terminaremos haciendo algunas consideraciones sobre las consecuencias de los resultados obtenidos para la enseñanza.

Este artículo forma parte de un proyecto de investigación más amplio que pretende diseñar, implementar y evaluar una Secuencia de Enseñanza-Aprendizaje (SEA) sobre el tema de energía y trabajo en cursos introductorios de física. El trabajo que aquí presentamos pretende fundamentar epistemológicamente la definición de los objetivos de aprendizaje de forma clara y explícita para el contexto educativo elegido. De forma que la formulación del conocimiento a aprender se pueda utilizar para una enseñanza que afronte algunos de los retos y dificultades mencionados reiteradamente en la investigación.

El largo y complejo proceso de elaboración del concepto de energía

Uno de los principales desafíos en la enseñanza de la energía es la compleja red de conceptos y niveles de interpretación asociados al concepto de energía, es decir, las "sutilezas" del concepto de energía. En este estudio compartimos con otros autores que la historia y epistemología de la ciencia puede ayudar a identificar las formas en que las ideas evolucionan hasta su estado actual. Identificar las barreras epistemológicas y ontológicas, puede ayudar a una comprensión profunda de los conceptos y entender las relaciones con otros conceptos similares, pero epistemológicamente diferentes. Estas características epistemológicas pueden informar de manera útil el enfoque de enseñanza y ayudar a evitar perspectivas inexactas o excesivamente simplistas (Duchsl, 1994; Guisasaola, 2013; Matthews, 2017). En el caso de la energía, la clarificación epistemológica es necesaria por diversas razones. Hace ya más de 60 años, el premio Nobel Richard Feynman indicó (1963), "It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is" (p. 4-2). Más recientemente, J.W. Jewett (2008), entre otros, mostró la confusión en la presentación del concepto de energía y otros conceptos relacionados, así como las dificultades para definir la energía. De hecho, muchos libros de texto actuales se han vuelto más circunspectos y suelen evitar una definición explícita de energía, definiendo directamente tipos de energía como cinética y potencial (ver, por ejemplo, Tipler y Mosca, 2008; Young y Freedman, 2019). Sin embargo, la conclusión obvia es que

no podemos enseñar adecuadamente el concepto de energía a menos que podamos decir a qué concepción de energía queremos llegar en la instrucción del tema específico a enseñar. Esperamos que el análisis epistemológico proporcione ideas clave para saber cómo se ha construido el marco teórico actual. Lo que sigue es un breve bosquejo histórico del desarrollo de los conceptos claves interrelacionados con la energía y el principio de conservación.

El desarrollo que se expone del concepto de energía desde el siglo XVII al XX, se centra en los aspectos señalados en el currículo de Física en el tema de "energía y trabajo" dentro del marco de la mecánica newtoniana, específicamente para el nivel de Bachillerato y los cursos introductorios universitarios. En este contexto, nos centramos en aspectos tales como la energía cinética y potencial, las transformaciones de energía, el trabajo y la energía, así como las relaciones entre ambos conceptos y el principio de conservación de la energía (Colonnese et al., 2012; Domènech et al., 2007; Etkina et al., 2014). No se abordan otros aspectos tratados en los campos de termodinámica o física moderna tales como el segundo principio de la termodinámica, la degradación de la energía, la energía de radiación o la energía en el marco relativista.

En el siglo XVII se formuló una de las primeras leyes de conservación en el estudio de colisiones. Christian Huygens analizó las colisiones elásticas y demostró que una cantidad correspondiente a mv^2 se mantenía constante durante el proceso. G. W. Leibniz a la cantidad mv^2 le dio el nombre de "vis viva" para diferenciarla de la cantidad de movimiento (mv) que en la época dominaba la "verdadera" medida del movimiento. El enfrentamiento entre vis viva y cantidad de movimiento continuó durante años. La vis viva se transformaría lentamente en nuestra energía cinética. En 1802 en una conferencia en la Royal Society, Thomas Young fue el primero en utilizar el término "energía" en su sentido moderno, en lugar de vis viva. En 1892 Gaspard G. Coriolis incorporaba el factor $\frac{1}{2}$ a la cantidad que hoy conocemos como energía cinética (Dugas, 2012; Hecht, 2019).

Un primer paso importante en la unificación de fenómenos físicos considerados como diferentes, se produjo con las investigaciones de Robert Mayer en 1842. Mayer abordó el estudio de fenómenos que incluyen dominios hasta entonces separados como movimiento y calor, o bien electricidad y movimiento, y estableció una relación numérica llamada "valor equivalente" entre fenómenos. Por ejemplo, en su análisis del funcionamiento del electróforo, concluyó que cada vez que se realiza un efecto mecánico (rozamiento) y se obtiene un efecto eléctrico (chispa), el efecto mecánico se transforma en eléctrico y calcula un valor equivalente mecánico de la electricidad. Hizo lo mismo con la transformación del efecto mecánico del calor. Sin embargo, Mayer formalizó su tratamiento de la equivalencia de los fenómenos mediante el concepto de fuerza, no de energía. James Joule, en 1843, profundizó en los trabajos de unificación de fenómenos diferentes y, estableció métodos experimentales para definir una relación numérica y determinar el equivalente mecánico del calor. Hacia la mitad del siglo XIX, se comenzó a utilizar la palabra "energía" para explicar las transformaciones entre diferentes fenómenos y su "valor equivalente". La energía reemplazó a la teoría de fuerza de Mayer (Lopes Coelho, 2009).

Un segundo avance en la teoría de la energía fue impulsado por los esfuerzos de William Thomson y William J.M. Rankine por definir y clasificar el concepto de energía. Estos esfuerzos fueron, en gran medida, la culminación de medio siglo de investigación sobre los principios físicos subyacentes a las nuevas máquinas térmicas que impulsó la revolución industrial. En 1849 Thomson utilizó por primera vez el término energía para referirse a la cantidad de trabajo que cualquier sistema puede realizar. En 1852 Rankine introdujo la clasificación de la energía en dos tipos: "energía real" y "energía potencial o latente"; describió la "energía real" como energía de actividad y la "energía potencial" como

energía de “configuración”. Rankine introdujo el término energía potencial, que posteriormente se desarrollaría como la energía que el sistema no tiene en posesión, sino que solo tiene el poder de adquirir. James Maxwell, en 1872, expresó muy claramente que la energía potencial se pensaba como energía no desarrollada. Respecto al término “energía real”, Thomson lo reemplazó por el término “energía cinética” que principalmente significaba la capacidad de un cuerpo en movimiento para realizar un trabajo. En 1850 Rudolf Clausius introdujo la idea de que un sistema cerrado tiene una cantidad de energía que no es directamente observable, pero que está asociada a los movimientos internos de las partículas y formalizó el concepto de “energía interna”. Posteriormente, en 1860-1880, James C. Maxwell y Ludwig Boltzmann desarrollaron la teoría cinética de los gases que les permitió desarrollar una idea más detallada de cómo se distribuye la energía interna en un sistema de partículas en movimiento. Durante el resto del siglo XIX la clasificación de todas las energías bajo el título de "potencial", "cinética" e “interna” fue ampliamente aceptada. Uno de los beneficios de los esfuerzos de clarificación conceptual de Thomson y Rankine fue la crítica de Hertz, en 1894, del concepto de energía como “sustancia”. Hertz utilizó el concepto de energía potencial para mostrar que la energía no se ajusta al concepto de sustancia, pues la cantidad de una sustancia depende de la sustancia misma y no de otras, mientras que la energía potencial de un cuerpo depende de otros cuerpos (Roche, 2003). Posteriormente los trabajos de Plank sobre la conservación de la energía mostraron, sin lugar a duda, que considerar la energía como sustancia es una idea errónea que no se ajusta al principio de conservación (Holton et al., 2001). En el último cuarto del siglo XIX se llegó a un consenso en la formulación de la “ley de la energía”, que Thomson y Tait (1879) expresaron de la siguiente manera:

«The whole work done in any time, on any limited material system, by applied forces, is equal to the whole effect in the forms of potential and kinetic energy produced in the system, together with the work lost in friction» (citado por Kanderakis, 2014, pp.1305).

En el siglo XX, la energía cinética ya no podía considerarse la única forma de energía “real” y, también se produjo un cambio de significado en la interpretación de la energía potencial. En la mayoría de sus aplicaciones, la energía potencial ya no significaba energía “no desarrollada”. Este cambio puede ser debido a que se consideró que un resorte comprimido (o una masa en una altura) está tan inmediatamente listo para realizar un trabajo como un cuerpo que posee energía cinética. En la actualidad, el significado de energía potencial que predomina es el de "energía de configuración" frente a "energía no desarrollada". La aceptación de la “realidad física” de la energía potencial significa que la conservación de la energía está ahora sólidamente establecida experimental, teórica e interpretativamente, más allá de una visión "contable" de este principio. Así mismo, hoy en día, la energía interna se define como la energía asociada con cualquier variable física posible que define el estado de las partículas del sistema. Esta energía incluye tanto la asociada a la estructura del sistema (energía interna de posición) como a los cambios de temperatura (energía interna térmica), energía química, etc. (Holton et al., 2001).

Otro de los conceptos relacionados con la evolución del concepto de energía es el concepto de trabajo. Su introducción fue una contribución decisiva para el establecimiento de la conservación de la energía, pues al definirse de manera independiente de las propiedades de los sistemas, permitió relacionar cuantitativamente los cambios en las propiedades de los sistemas que interactuaban (De Berg, 1997). En el siglo XIX, la capacidad de las máquinas para realizar un trabajo fue, por supuesto, el concepto básico a analizar. En 1877 J.C. Maxwell en un intento de clarificación de los conceptos de energía y trabajo definió:

«WORK is the act of producing a change of configuration in a system in opposition to a force which resists that change. ENERGY is the capacity of doing work» (Maxwell, 1920, p. 54).

Maxwell definió energía y trabajo como dos conceptos diferentes, aunque estableció una relación entre ellos. Él consideraba que el trabajo era una medida cuantitativa del esfuerzo invertido en cambiar el sistema, y que la energía suministraba el trabajo necesario para ese cambio. La definición de Maxwell fue ampliamente aceptada durante un tiempo. Sin embargo, esta definición suscitó críticas desde el comienzo. En 1879, Oliver Logse argumentó que el hecho de que un cuerpo tuviera energía no significaba necesariamente que pudiera realizar un trabajo. El concepto de trabajo medido por el producto de la fuerza y la distancia, se había desarrollado lentamente hasta reconocer sus limitaciones y definir su significado. En la actualidad se admite que la definición cuantitativa de trabajo como el producto escalar de la fuerza y el desplazamiento sobre el que actúa dicha fuerza, es aplicable solo a partículas puntuales sin estructura o a objetos perfectamente rígidos (ver, por ejemplo, Sherwood, 1983). En la física actual, el trabajo se define como la transferencia de energía de un sistema a otro mediante la acción de una fuerza a lo largo de la distancia (Chabay y Sherwood, 2002, cap.6). Mungan (2007) expresó las definiciones actuales de calor y trabajo en física clásica, incluidas en el primer principio de la termodinámica:

«Traditionally, the first law of thermodynamics is written in the form $W + Q = \Delta E$. Here Q represents energy transferred from hot objects in the surroundings to the cooler system of interest by thermal conduction (including convection) or by blackbody radiation. On the other hand, W is the energy transferred from external agents of bulk forces (such as springs, muscles, gravitational or electric fields, or high-pressure gases) that displace the system in part or overall» (p.290).

En el siglo XX, el concepto de energía evolucionó desde la idea de Maxwell de “energía como capacidad de realizar trabajo”, en el siglo XIX, hacia la de energía como “capacidad de producir cambios”. Sin embargo, también fue criticada por la comunidad. Boohan y Ogborn (1996), entre otros, argumentan que poseer energía no es lo que impulsa el cambio ya que esta interpretación contradice el segundo principio de la termodinámica. La entropía es lo que decide si el cambio puede ocurrir. Otra interpretación contemporánea de la energía seguida por muchos físicos, es la propuesta por Feynman (1963) que define la energía como una cantidad escalar que se conserva en cualquier proceso y transformación física (ver, capítulo 4 de su libro, en sección 4.1). Esta es una definición en términos de propiedades donde el principio de conservación se convierte en el postulado de la existencia de la energía misma. Es un tipo de definición ontológica inusual en las ciencias físicas, aunque muy común en matemáticas.

Durante los siglos XIX y XX se lograron medir tipos específicos de energía asociadas a cambios específicos, como la cinética, la potencial gravitatoria, la potencial elástica y la energía interna térmica de las partículas, entre otras. Las definiciones del XIX sobre tipos de energía se modificaron parcialmente o se adaptaron a los nuevos descubrimientos del siglo XX. Así cada tipo de energía se define en relación al sistema elegido y el cambio específico que experimenta. La energía cinética se define como una medida del cambio que ya ha ocurrido al darle al cuerpo una velocidad, o como una medida del cambio que puede ocurrir cuando ese cuerpo interactúe posteriormente con otro cuerpo y su velocidad varíe en consecuencia. La energía potencial es una medida del cambio de configuración en un sistema de partes que interactúan. Por ejemplo, cambio asociado con el estiramiento de un resorte se caracteriza por la energía potencial elástica, que es una medida del cambio de configuración que ha ocurrido, así como el cambio que ocurrirá al soltar el resorte. La energía interna es la medida a nivel microscópico de los cambios en el estado de las partículas del sistema. Estas definiciones llevaron al consenso actual de *definir la energía como la magnitud escalar del cambio físico—un cambio que ya ha ocurrido o que está por ocurrir—que experimenta un sistema*. Esta definición contemporánea de energía reconoce que, a nivel fundamental, existen la materia, la interacción y el cambio. Debido a que la

materia interactúa, se producen cambios observables que son el objeto de estudio de la física. En la física clásica contemporánea, la selección de un sistema de interés y la identificación de las interacciones de ese sistema con su entorno son pasos cruciales para aplicar los principios de conservación de la energía, su transformación y su transferencia (Hecht, 2019; Lindsay, 1971).

En relación a la conservación de la energía, sabemos que la fuerza es el agente del cambio y la energía es una medida de la magnitud de ese cambio, *la naturaleza simétrica de las interacciones (tercera ley de Newton) desempeña un papel central en la característica fundamental de la energía, su conservación*. El principio de conservación de la energía está asociado a la elección de un sistema de interés que permite resumir el principio en todos los campos de la física como “la energía total de un sistema aislado se conserva” o bien, “un cambio en un sistema va acompañado de un cambio de energía equivalente en el sistema con el que interactúa” (Hecht, 2008; Solbes et al. 2009; Tarsitani y Vicentini, 1991).

La figura 1 muestra una línea de tiempo que ilustra el desarrollo histórico de las ideas sobre el concepto de energía para explicar los cambios físicos que sufren los sistemas, en el contexto de la física clásica. En la parte inferior mencionamos los principales fenómenos físicos que centraron la investigación en tres periodos históricos. En la parte superior de la línea temporal se indican los modelos explicativos que incluyen un conjunto de ideas que fueron consensuadas por la comunidad científica en cada período histórico y que pueden ilustrar los cambios epistemológicos en los modelos científicos. Utilizamos el término modelo explicativo como un conjunto de ideas que tienen el potencial de explicar muchos fenómenos diferentes (Jiménez-Aleixandre y Crujeiras, 2017).

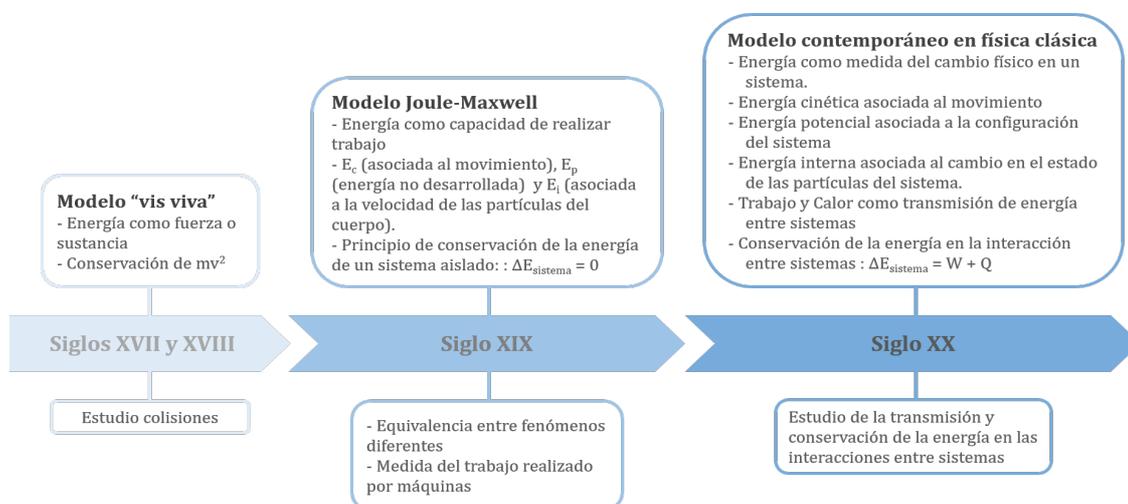


Figura 1. Una línea temporal del desarrollo del concepto de energía para explicar los cambios en las interacciones entre cuerpos en la física clásica.

El desarrollo histórico y epistemológico del concepto de energía y el principio de conservación (Figura 1) nos permiten definir una serie de ideas clave a tener en cuenta en un contexto de enseñanza de la energía para cursos introductorios de física. Estas ideas se exponen a continuación:

IC1.- Las conexiones entre fenómenos de distinta naturaleza implican transformaciones y transferencias de energía.

IC2.- Se definen tres tipos de energía asociados a un sistema: cinética (asociada al movimiento del sistema), potencial (asociada a la configuración del sistema) y energía interna asociada al estado de las partículas del sistema.

- IC3.- En la física clásica contemporánea la energía se entiende como la medida escalar del cambio físico asociado a un sistema de interés—un cambio que ya ha ocurrido o que está por ocurrir.
- IC4.- La energía y sus mecanismos de transferencia (trabajo y calor) se conectan en el principio de conservación de la energía (primer principio de la termodinámica). Se establece la diferenciación conceptual entre energía, trabajo y calor.
- IC5.- La identificación en el análisis energético de una cantidad que se conserva (principio de conservación) se asocia a un sistema y su entorno.

Objetivos de aprendizaje para cursos introductorios de física

El enfoque de enseñanza epistemológicamente fundamentado sobre un tema específico debe promover dos objetivos: (a) ayudar al alumnado a desarrollar una comprensión científica de los conceptos, leyes y modelos y (b) proteger contra simplificaciones excesivas que chocan con la forma en que se aborda el tema, conceptualizado en el ámbito de la física (National Research Council, 2012). Es en el segundo objetivo donde el análisis epistemológico resulta un instrumento útil. El análisis epistemológico realizado en el apartado anterior es una herramienta educativa para la enseñanza de la transposición didáctica puesto que proporciona una manera de identificar las ideas científicas clave que construyen el contenido conceptual que se enseñará en un nivel educativo específico (Ruthven et al., 2009; Kelly y Duschl, 2002). A la hora de establecer la transposición didáctica de las claves epistemológicas, hemos tenido en cuenta los criterios de la metodología de Investigación Basada en el Diseño (IBD) que establecen la importancia de explicitar el tema del currículum y el nivel educativo en el que se definen los objetivos de aprendizaje (Guisasola et al., 2021)

A lo largo del proceso histórico, se ha buscado ampliar la comprensión de los cambios en los fenómenos físicos, abarcando desde el estudio de las colisiones hasta el análisis de las interacciones entre partículas. En este camino, se investigó también la eficacia de las máquinas mecánicas y térmicas. Este proceso condujo, en primer lugar, a la definición de los tipos de energía (IC2), su transformación y transferencia en los fenómenos físicos (IC1), y a la identificación de tres formas de energía: cinética, potencial e interna (IC2). De esta manera, se logró comprender el concepto de energía como una medida de los cambios experimentados por un sistema (IC3). Esta definición de energía implica que el aumento o disminución de la energía en un sistema refleja el cambio ocurrido en dicho sistema. El cambio asociado al elevar un cuerpo a una altura h respecto al suelo se expresa mediante la energía potencial gravitatoria, que refleja el cambio en la configuración del sistema cuerpo-Tierra, así como el cambio que ocurrirá al dejar caer el cuerpo. De manera similar, la energía cinética puede interpretarse como una medida del cambio que ya ha tenido lugar al impartir velocidad a un cuerpo, o como una indicación del cambio que aún debe ocurrir cuando dicho cuerpo interactúe con otra entidad y su velocidad se modifique. Estas ideas fundamentales nos permiten plantear un primer bloque de objetivos de aprendizaje en la tabla 1.

En segundo lugar, el estudio cualitativo y cuantitativo de la transferencia de energía entre un sistema y su entorno da lugar a las definiciones de trabajo mecánico y calor, su diferenciación del concepto de energía y la medida de su conservación (IC4). Esto permite comprender la definición de trabajo y calor más allá de cálculos operativistas y comprender su naturaleza de transferencia de energía. A partir de esta idea clave definimos un segundo bloque de objetivos de aprendizaje en la tabla 1.

En tercer lugar, a partir de la definición de tipos de energía y especialmente a partir del siglo XIX, se realizaron importantes esfuerzos para cuantificar la energía cinética y potencial (IC2). En este estudio, nos centramos exclusivamente en la cuantificación de la energía cinética y la energía potencial gravitatoria. La energía interna se aborda solo de manera cualitativa, y la energía potencial elástica se estudia en el currículo en el tema de oscilaciones. En consonancia con ello, definimos un tercer bloque de objetivos de aprendizaje en la tabla 1.

Finalmente, en los dos últimos siglos del desarrollo del concepto de energía, se destacan los esfuerzos de definir y cuantificar el concepto de energía y su conservación (IC3 e IC5). Esto nos ha llevado a establecer un cuarto grupo de objetivos relacionados con el principio de conservación de la energía y su cuantificación. Por las limitaciones del tema elegido, los objetivos no hacen referencia a la transferencia de energía por calor (Tabla 1).

Tabla 1. Relaciones entre los elementos epistemológicos clave y los objetivos de aprendizaje

Claves epistemológicas del concepto de energía	Objetivos de aprendizaje
<p><i>El concepto de energía:</i> El concepto de energía implica comprender fenómenos de transformación y transferencia entre fenómenos físicos (IC1), la definición de tres tipos de energía: cinética, potencial e interna (IC2) y la comprensión del concepto de energía como medida de los cambios experimentados por un sistema (IC3).</p>	<p><i>Para un sistema constituido por un cuerpo o un conjunto de cuerpos:</i> O1.1. Reconocer formas de energía asociadas a un sistema: cinética, potencial e interna. O1.2. Saber analizar los cambios mediante transformaciones (dentro del sistema) y transferencias (sistema-entorno) de energía asociadas al sistema físico que se define para analizar los procesos. O1.3. Comprender que la energía es la medida escalar del cambio que se ha producido y/o del cambio que se puede producir en el sistema.</p>
<p><i>Definición de calor y trabajo:</i> La transferencia de energía entre un sistema y su entorno dan lugar a las definiciones de trabajo mecánico y calor, su diferenciación del concepto de energía y la medida de su conservación (IC4).</p>	<p><i>Definición de calor y trabajo como transferencia de energía entre sistema-entorno</i> O2.1. Entender que el trabajo es una transferencia de energía entre sistema-entorno mediante fuerzas. Comprender y saber aplicar su definición cuantitativa. O2.2. Entender que el calor es una transferencia de energía entre sistema-entorno debido a una diferencia de temperaturas.</p>
<p><i>Definición cuantitativa de energía cinética y energía potencial:</i> La cuantificación de la energía cinética asociada al movimiento del sistema, y la energía potencial asociada al movimiento del sistema (IC2).</p>	<p><i>Definición operativa de energía cinética y energía potencial</i> O3.1. Comprender que la energía cinética asociada a un sistema depende de su masa y el cuadrado de su velocidad. Saber aplicar su definición operativa en diferentes contextos. O3.2. Comprender que la energía potencial gravitatoria depende de la masa del sistema objeto-Tierra, la atracción gravitatoria y de la diferencia de altura respecto a la superficie de la Tierra. Saber aplicar su definición operativa en diferentes contextos.</p>
<p><i>Definición del principio de conservación</i> La conservación de la energía se asocia a un sistema y su entorno (IC2, IC4, IC5)</p>	<p><i>El principio de conservación de la energía se cumple para cualquier sistema</i> O4.1. Comprender que el principio de conservación establece una relación entre: $\Delta E_{\text{sistema}} =$ Cantidad energía transferida sistema-entorno O4.2. Comprender que si el sistema está aislado la Transferencia de energía es cero y el principio de conservación se enuncia como $\Delta E_{\text{sistema}} = 0$. O4.2. Comprender que si hay fuerzas externas sobre el sistema y no hay transferencia de calor, el principio de conservación se enuncia como: $\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta E_{\text{int}} = W_{\text{ext}}$. O.4.3. Saber aplicar el principio de conservación en diferentes contextos</p>

A continuación, describimos algunas líneas de actuación para la clarificación conceptual en la enseñanza del concepto de energía en cursos introductorios, derivadas de los resultados del análisis epistemológico y su consecuente transposición didáctica en objetivos de aprendizaje.

Implicaciones para la enseñanza de la energía en Mecánica

La investigación sobre enseñanza-aprendizaje de contenidos específicos muestra que la falta de un análisis epistemológico adecuado puede dar lugar a enfoques conceptuales imprecisos o incorrectos, incluso cuando el objetivo general es coherente con el plan de estudios. Ver, entre otros, “the clarification and analysis of science subject matter” propuesto por Duit et al. (2012), o bien, “analysis of the content knowledge” propuesto por Tiberghien et al. (2009). La definición de los objetivos de aprendizaje desde el análisis epistemológico, nos permite establecer algunas líneas de actuación para la enseñanza que aporten clarificación conceptual como respuesta a algunas de las dificultades ampliamente recogidas en la investigación. Estas líneas generales de actuación, junto con una concreción adecuada en secuencias de enseñanza-aprendizaje, debería llevar al alumnado a diferenciar gradualmente magnitudes que están estrechamente relacionadas con el concepto de energía pero que son epistemológicamente diferentes.

Un enfoque sistémico en la comprensión de la energía

Una primera dificultad en la enseñanza de la energía está relacionada con la comprensión del enfoque sistémico. Los físicos, al analizar situaciones complejas, definen el sistema (cuerpo o conjunto de cuerpos) sobre el que definirán las magnitudes y variables a analizar, evitando complicaciones asociadas a procesos y magnitudes difíciles de analizar. La elección de un sistema permite comprender el concepto de conservación de la energía (lo mismo ocurre con la conservación de otras magnitudes como la cantidad de movimiento, conservación de la masa y de la carga, etc.). Ésta es generalmente la primera cuestión que se plantea en los libros de física introductoria en el tema de termodinámica. Sin embargo, en el campo de la mecánica no es frecuente que los libros de texto hagan una mención explícita al concepto de sistema en el tema de energía y trabajo. La elección de un sistema de interés para el análisis energético no siempre se enseña de forma explícita y suelen ser frecuentes expresiones que asocian la energía potencial con un objeto en vez de con un sistema (Jewett, 2008). Uno podría argumentar que no es una cuestión relevante ya que a menudo se pueden obtener soluciones correctas a los problemas del final de capítulo sin necesidad de precisar el sistema. Sin embargo, diferentes investigaciones han mostrado que la inconsistencia en la definición del sistema tiene consecuencias en las dificultades del alumnado para comprender la energía y su conservación. Muchos estudiantes de cursos de física introductoria no reconocen que la energía es una propiedad de un sistema que se define previamente al análisis energético y no reconocen que cualquier combinación de cuerpos puede definirse como un sistema (Guisasola et al., 2017; Lindsey et al., 2012; Seeley et al., 2019).

Definiciones actuales de los conceptos de energía y trabajo

En el apartado del desarrollo del concepto de energía se describió un modelo inicial de energía “vis viva” como sustancia contenida en los cuerpos y que se puede gastar (Figura 1). La investigación indica que este modelo se ha detectado preferentemente en el alumnado de niveles de Secundaria Obligatoria (Trumper y Gorsky, 1993) y que persisten algunas características como la “naturaleza pasiva de la energía” (el cuerpo tiene energía potencial gravitatoria y puede gastarla) o bien, “confunden energía y fuerza” (produce deformaciones en el choque de cuerpos) en niveles de física introductoria (Neumann y Nordine, 2023). Las dificultades del alumnado descritas no son sorprendentes y pueden

explicarse, en parte, por sus sólidas raíces en las largas experiencias que han tenido en la vida diaria, por la influencia de los medios de comunicación y quizás, por su experiencia escolar. Es un modelo intuitivo de energía, que puede ser útil como inicio de discusión, pero el profesorado debe recordar la gran distancia con el modelo científico, para ayudar al alumnado a comprender que los cuerpos no “contienen” la sustancia energía. La madera o la gasolina, requieren oxígeno para quemarse y no son cuerpos energéticos completos por sí mismos. Un cuerpo en el espacio suficientemente alejado de los planetas no “cae” y “no tiene” energía potencial gravitatoria.

Otra propuesta que se utiliza frecuentemente es la de enseñar energía como la “capacidad de realizar un trabajo” que surgió a mediados del siglo XIX y, esta primera definición sigue vigente más de cien años después en algunos libros de texto y propuestas en el aula. Este enfoque comienza con la definición matemática de trabajo como fuerza por desplazamiento y continúa con el enunciado del teorema de trabajo-energía para introducir en uno de sus términos la energía cinética de traslación. Sin embargo, esta propuesta ha recibido severas críticas desde la enseñanza de la física por varias razones. En primer lugar, diferentes estudios indican que muchos estudiantes interpretan la capacidad de realizar trabajo como que la energía es la “fuerza” que causa el cambio, confundiendo los conceptos de fuerza y energía (Bächtold y Munier, 2019; Trelu y Toussaint, 1986; Trumper y Gorsky, 1993). La energía es la propiedad de un sistema en un estado concreto mientras que la fuerza es la medida de la intensidad de la interacción entre dos cuerpos. En segundo lugar, la definición es circular, si la energía es la capacidad de realizar trabajo y si el trabajo es una transferencia de energía, entonces la energía es la capacidad de transferir energía. La definición es una tautología obvia (Arons, 1989; Hicks, 1983; Lehrman, 1973). Además, basta con pensar en el segundo principio de la termodinámica para entender que la definición no es aceptable hoy en día. Otra cuestión que pone en duda la idoneidad de este enfoque es que la energía se introduce a menudo en el contexto del teorema trabajo-energía, que en realidad es una integral de línea de la segunda ley de Newton y trata de la cantidad de movimiento, no de la energía (Chabay et al., 2019). Arons (1989) subraya explícitamente que a diferencia del teorema energía-trabajo, la primera ley de la termodinámica (el principio de conservación de la energía) no es derivable de las leyes de la dinámica del movimiento. Varios trabajos de investigación señalan que no comprender esta diferencia es una de las principales concepciones alternativas en cursos introductorios de física (Arons, 1989; Lindsey et al., 2009; Sherwood, 1983). El teorema del trabajo-energía solo trata de la energía cinética de traslación, no existe un término de energía y no predice cambios de energía térmica o química. Esta reducción del concepto de energía a la idea de energía de traslación puede llevar a muchos estudiantes a confusiones a la hora de analizar el principio de conservación y la disipación de la energía incluso en contextos de movimiento de traslación con rozamiento y confundir energía interna y calor (Besson, 2001; Domènech et al., 2013).

Una comprensión funcional del Principio de Conservación de la Energía

Quizás, la prueba más notable del fracaso de la enseñanza convencional en lograr que el alumnado comprenda funcionalmente el concepto de energía son las dificultades que tienen para aplicar razonadamente el PCE, pese a que su enseñanza ocupa una parte importante del tema de energía en mecánica. Múltiples investigaciones han mostrado reiteradamente que el alumnado realiza predicciones incorrectas cuando aplica el principio de conservación en el análisis de sistemas simples y en contextos de movimiento de traslación con rozamiento, confundiendo energía interna y calor (Duit, 1981; Solbes et al., 2009). Así mismo, tienen dificultades en comprender que la energía se conserva en cualquier sistema elegido y su entorno, o no reconocen su conservación. Estos resultados

suponen una disminución en las expectativas de lograr que el alumnado comprenda el principio de conservación como objetivo último del aprendizaje en el currículum de secundaria y cursos introductorios de física en la universidad (Colonnese et al., 2012; Neumann y Nordine, 2023). La comprensión del principio de conservación facilita la comprensión de otras formas de energía como, por ejemplo, la energía potencial. La comprensión de la energía potencial como la energía almacenada como resultado de un cambio de configuración en un sistema de partes que interactúan, es un concepto muy útil para apoyar la presunción de conservación de energía en situaciones en las que la E_c desaparece, total o parcialmente (Hecht, 2003).

Esbozo de una secuencia de enseñanza-aprendizaje basado en el análisis epistemológico

Ya hemos indicado que el presente trabajo se centra en justificar epistemológicamente los objetivos de aprendizaje definidos desde un enfoque epistemológico. No obstante, nos parece oportuno terminar este apartado con la presentación de un itinerario de enseñanza con las preguntas guía que desarrollarán nuestro próximo trabajo sobre el diseño de la secuencia de enseñanza-aprendizaje (SEA).

El itinerario de enseñanza comienza con el planteamiento de un problema general que iremos contextualizando y limitando: ¿de qué hablamos cuando utilizamos la palabra energía?

Una vez que se alcanza con el alumnado un mínimo consenso sobre la relación de cada idea con el concepto de cambio, la siguiente pregunta buscará identificar esos cambios, que luego clasificaremos según las distintas formas de energía. Así pues, se establece un índice de preguntas guía para intentar resolver el problema:

1.1. ¿En qué formas se presenta la energía?

1.2. ¿La energía puede transformarse de un tipo en otro? Primera aproximación cualitativa de la conservación de la energía al estudiar sistemas aislados

Las preguntas guía se acompañarán de un andamiaje de actividades con un enfoque de enseñanza activa que permita establecer un primer modelo de energía relacionado con los tipos de energía y su transformación. En todo momento se utiliza el análisis sistémico justificado en el apartado anterior, así como el significado de los tipos de energía del modelo contemporáneo (Figura 1). Del análisis de los diferentes tipos de energía asociados a determinados tipos de cambio del sistema, surge una definición de energía como una magnitud que mide el cambio que experimenta un sistema.

Las siguientes preguntas guía se centran en problemas de transferencia de energía en el contexto de la mecánica y en establecer la hipótesis de que un cambio en un sistema va acompañado de un cambio de energía equivalente en el sistema/entorno con el que interactúa. Las actividades se centran especialmente en resaltar que si no hay sistema y entorno o dos sistemas no puede haber transferencia, utilizando el significado contemporáneo de transferencia de energía. Las preguntas guía son:

2.1. ¿Puede haber transferencia de energía entre el sistema y su entorno?

2.2. ¿Qué cantidad se conserva en las transferencias? Segunda aproximación cualitativa al principio de conservación.

A continuación, nos planteamos el problema de cuantificar los tipos de energía, sus transformaciones y transferencia, así como su conservación para el tema de “energía y trabajo”. Aquí limitamos el problema que abordamos a la transferencia de trabajo dejando la transferencia de energía en forma de calor para otros temas. Hacemos ver al alumnado

que este tipo de procedimiento es propio de la ciencia, donde los científicos limitan los problemas y sus variables para analizarlos en profundidad y poder abordar su solución. Así mismo, se relaciona los significados cualitativos estudiados hasta ahora con las definiciones cuantitativas de las magnitudes trabajo, energía cinética y potencial gravitatoria. Las preguntas guía son:

3.1. ¿Cómo se mide la energía transferida de/a un sistema a/de otro sistema/entorno mediante trabajo mecánico?

3.2. ¿Cómo medir la energía cinética de un sistema?

3.3. ¿Cómo medir la energía potencial gravitatoria del sistema?

Por último, abordamos de forma cuantitativa la conservación de la energía de un sistema. Se trata de demostrar cuantitativamente la hipótesis que se ha establecido cualitativamente en el apartado 2 y cuantificar el principio de conservación $\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta E_{int} = W_{ext}$. Además, se aplica el principio de conservación en problemas abiertos en contextos socio-científico de la mecánica. Las preguntas guía son:

4.1. ¿La energía se conserva en la interacción entre un sistema y el entorno/otro sistema?

4.2. Aplicación del principio de conservación de la energía en problemas abiertos.

En definitiva, se trata de que el alumnado trabaje, comprenda y aplique un modelo básico de energía para mecánica newtoniana en el tema de energía y trabajo, guiados a través de preguntas y actividades que ayudan a responder a las preguntas (Figura 2). Se podría argumentar que los contenidos de la secuencia son similares a los de la gran mayoría de libros de texto tradicionales de Bachillerato, sin ofrecer novedades relevantes. Sin embargo, la introducción de un itinerario de preguntas guía que ayuden al alumnado a plantearse la necesidad de un análisis sistémico. Introducir desde el comienzo la elección de un sistema de interés y la identificación de las interacciones del sistema con su entorno son pasos cruciales para aplicar la relación entre energía y trabajo, que frecuentemente son olvidados o no se hacen explícitos en los libros de texto. Sin estos procedimientos de análisis no parece plausible definir la energía como medida de los cambios del sistema. En consecuencia, la necesidad de cuantificar el hecho de que un cambio en un sistema va acompañado de un cambio de energía equivalente en el entorno con el que interactúa, nos lleva a considerar los aspectos novedosos que aporta el enfoque epistemológico de la enseñanza de la energía propuesto en este trabajo. Así mismo, el análisis de fenómenos reales con rozamiento que frecuentemente no son abordados en los libros de texto, llevan a la necesidad de considerar la energía interna de tipo térmico en casos como el rozamiento de cuerpos en movimiento o de choques con deformación.

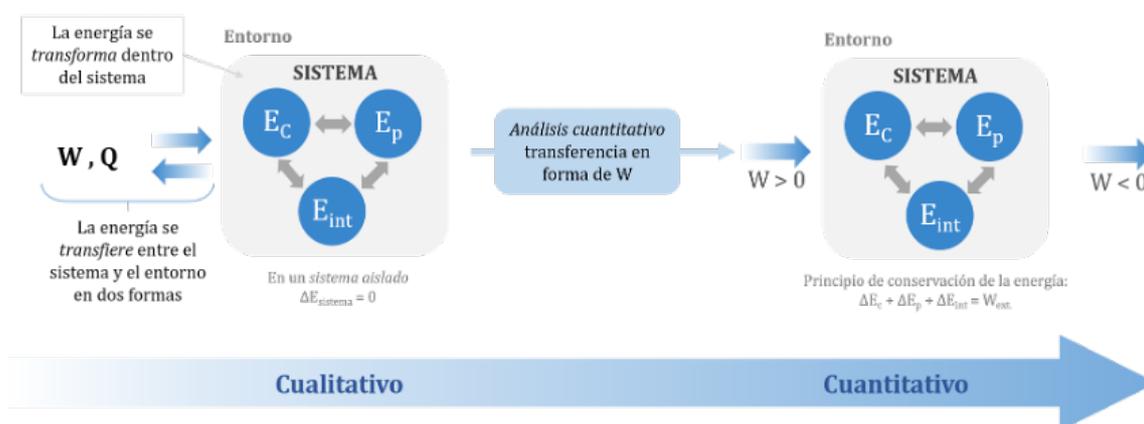


Figura 2. Elementos de un modelo básico de energía en mecánica introductoria.

Conclusiones

Se puede concluir que en la enseñanza se debe evitar cualquier definición simple y breve de energía; de hecho, al igual que otras magnitudes físicas, la energía es una magnitud que necesita una construcción progresiva de significado mediante su utilización en diferentes contextos y problemas (Domènech et al. 2023; López-Simó y Couso, 2022; Soto et al., 2019). Desde nuestro enfoque epistemológico de la enseñanza de la energía en mecánica para cursos introductorios de física, sugerimos una secuencia de contenidos guiada por los objetivos de aprendizaje de la tabla 1. Una secuencia de enseñanza que comience la aproximación al concepto de energía por una familiarización cualitativa con procesos de cambio interpretados como transformación y transferencia. Podemos decir que la descripción de los cambios en un sistema mediante transferencia y/o transformación de energía implica una idea de energía como una medida de la capacidad de un sistema de interactuar para producir cambios y que esta medida escalar se conserva en la transformación. Aquí conviene aclarar que nuestro enfoque epistemológico no supone invalidar propuestas de enseñanza que utilizan los recursos del alumnado como “energía-sustancia” (Brewer, 2011; Wittman et al., 2019) o “energía-capacidad de hacer trabajo” (Bächtold y Munier, 2019), que pueden resultar útiles como estadios intermedios en la progresión del aprendizaje del concepto de energía, sino que reclamamos que el profesorado necesita una clarificación conceptual en su conocimiento pedagógico del contenido (PCK por sus siglas en inglés) que le permita hacer progresar al alumnado hacia una definición actual de energía, y así superar ideas de la energía del siglo XIX ampliamente criticadas en la actualidad. La descripción de los cambios en un sistema mediante transferencia y/o transformación de energía implica una descripción tanto a nivel macroscópico (mediante el concepto de trabajo mecánico) como microscópico (mediante el concepto de calor). El trabajo y el calor son transferencias de energía de un sistema a otro. Son un proceso; una vez hecho, ya no existe. Son algo que no se puede almacenar, lo que se almacena es la energía. Así el concepto de trabajo mecánico engloba las transferencias de energía cinética y, en su caso, potencial del sistema, mientras que el calor describe las transferencias a nivel microscópico junto con el término llamado “energía interna” (movimiento y rotación de las moléculas, energía de posición relativa de las moléculas, térmica, química ...). De acuerdo con la tabla de objetivos de aprendizaje, nuestra propuesta sugiere en primer lugar una aproximación cualitativa que incluya el balance de energía del sistema mediante la ecuación $\Delta E_{\text{sistema}} = \text{Cantidad energía transferida Sistema-Entorno}$. En el caso de la mecánica, proponemos dejar para otro tema el caso de transferencia de calor y analizar cualitativamente casos de trabajo mecánico y energía cinética y potencial tanto en sistema aislado del exterior, como sistemas sobre los que actúan fuerzas externas. Posteriormente, definir cuantitativamente el trabajo, energía cinética y energía potencial gravitatoria y elástica y, establecer a modo de hipótesis la relación incremento de energía igual a trabajo para a continuación, definir y aplicar el principio de conservación de forma cuantitativa en diferentes contextos.

En resumen, puede haber diversas estrategias de enseñanza y herramientas didácticas para lograr los objetivos de aprendizaje de la tabla 1. Los objetivos fundamentados epistemológicamente pueden constituir una guía de clarificación conceptual que ayude a que el alumnado aprenda una idea de la energía y del principio de conservación contemporánea que le permita reconocer los límites de las ideas de la energía del siglo XIX, en el desarrollo del currículo en mecánica para cursos introductorios de física. Nuestro próximo trabajo será diseñar, implementar y evaluar una secuencia de enseñanza aprendizaje que utiliza como objetivos de aprendizaje los definidos en la tabla 1 y concrete

el enfoque contemporáneo de la enseñanza de la energía en mecánica para cursos introductorios de física.

Referencias bibliográficas

- Arons, A. B. (1989). Developing the Energy Concepts in Introductory Physics. *The Physics Teacher*, 27(8), 506–517.
- Bächtold, M., y Guedj, M. (2013). Teaching energy informed by the history and epistemology of the concept with implications for teacher education. In *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 211–243). Springer.
- Bächtold, M., y Munier, V. (2019). Teaching energy in high school by making use of history and philosophy of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 56(6), 765-796.
- Besson, U. (2001). Work and energy in the presence of friction: the need for a mesoscopic analysis. *European Journal of Physics*, 22(6), 613.
- Boohan, R., y Ogborn, J. (1996). *Differences, energy and change: a simple approach through pictures*. Association for Science Education.
- Brewe, E. (2011). Energy as a substancelike quantity that flows: Theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 7(2), 20106.
- Chabay, R. W., y Sherwood, B. A. (2002). *Matter & Interactions. I. Modern Mechanics*. Wiley.
- Chabay, R., Sherwood, B., y Titus, A. (2019). A unified, contemporary approach to teaching energy in introductory physics. *American Journal of Physics*, 87(7), 504-509.
- Colonnese, D., Heron, P., Michelini, M., Santi, L., y Stefanel, A. (2012). A vertical pathway for teaching and learning the concept of energy. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(1), 21-50.
- De Berg, K. C. (1997). The development of the concept of work: a case where history can inform pedagogy. *Science and Education*, 6(5), 511-527.
- Domènech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P., y Vilches, A. (2007). Teaching of Energy Issues: A Debate Proposal for a Global Reorientation. *Science & Education*, 16(1), 43-64.
- Domènech, J. L., Menargues, A., y Limiñana, R. (2013). La superficialidad en la enseñanza del concepto de energía: una causa del limitado aprendizaje alcanzado por los estudiantes de bachillerato. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 31(3), 103-119.
- Domènech, J. L., Rey, A., Nicolás, C., y Martínez-Torregrosa, J. (2023). Enseñanza sobre calor y temperatura en la educación secundaria. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 113, 7-13-
- Dugas, R. (2012). *A History of Mechanics* (Revised Ed). Courier Corporation.
- Duit, R. (1981). Understanding Energy as a Conserved Quantity-Remarks on the Article by R. U. Sexl. *European Journal of Science Education*, 3(3), 291-301.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., y Parchmann, I. (2012). The

- Model of Educational Reconstruction - a Framework for Improving Teaching and Learning Science1. In D. Jorde & J. Dillon (Eds.), *Science Education Research and Practice in Europe: Retrospective and Prospective* (pp. 13-37). SensePublishers.
- Duschl, R. A. (1994). Research on the history and philosophy of science. In *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (p. Vol. 2, 443). Macmillan.
- Etkina, E., Gentile, M., y Van Heuvelen, A. (2014). *College Physics*. Pearson Education Inc, USA
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., y Sands, M. L. (1963). *The Feynman Lectures on Physics, Mainly Mechanics, Radiations and Heat*, volume1. Addison-Wesley Publishing.
- Guisasola, J. (2013). Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories. In *International Handbook of research in History, Philosophy and Science teaching* (pp. 129-156). Springer.
- Guisasola, J., Zuza, K., Ametller, J., y Gutierrez-Berraondo, J. (2017). Evaluating and redesigning teaching learning sequences at the introductory physics level. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020139.
- Guisasola, J., Ametller, J., y Zuza, K. (2021). Investigación basada en el diseño de Secuencias de Enseñanza-Aprendizaje: una línea de investigación emergente en Enseñanza de las Ciencias. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(1).
- Gutiérrez-Berraondo, J., Zuza, K., Zavala, G., Sarriugarte, P., y Guisasola, J. (2022). University student understanding and reasoning on work–energy relations. *European Journal of Physics*, 43(6), 065701.
- Hecht, E. (2003). An Historico-Critical Account of Potential Energy: Is PE Really Real? *The Physics Teacher*, 41(8), 486-493.
- Hecht, E. (2008). Energy Conservation Simplified. *The Physics Teacher*, 46(2), 77-80.
- Hecht, E. (2019). Understanding energy as a subtle concept: A model for teaching and learning energy. *American Journal of Physics*, 87(7), 495-503.
- Hicks, N. (1983). Energy is the capacity to do work-or is it? *The Physics Teacher*, 21(8), 529–530.
- Holton, G., Brush, S., y Evans, J. (2001). *Physics, the Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond*. Rutgers University Press.
- Jewett Jr., J. W. (2008). Energy and the confused student. Part I-V. *The Physics Teacher*, 46(1), 38–43; 81–86; 149–153; 210–217; 269–274.
- Jiménez-Aleixandre, M. P., y Crujeiras, B. (2017). *Epistemic Practices and Scientific Practices in Science Education BT - Science Education: An International Course Companion* (K. S. Taber & B. Akpan (eds.); pp. 69-80). SensePublishers.
- Kanderakis, N. (2014). What is the Meaning of the Physical Magnitude ‘Work’? *Science & Education*, 23(6), 1293-1308.
- Kelly, G. J., y Duschl, R. A. (2002). *Toward a research agenda for epistemological studies in science education Paper presented at the Annual Meeting of NARST*. New Orleans LA.
- Leaton Gray, S., Scott, D., y Mehisto, P. (2018). *Curriculum Reform in the European*

- Schools: Towards a 21st Century Vision*, 1-183. Springer Nature.
- Lehrman, R. L. (1973). Energy Is Not The Ability To Do Work. *The Physics Teacher*, 11(1), 15-18.
- Lindsay, R. B. (1971). The Concept of Energy and its Early Historical Development. *Foundations of Physics*, 1(4), 383-393.
- Lindsey, B. A., Heron, P. R. L., y Shaffer, P. S. (2009). Student ability to apply the concepts of work and energy to extended systems. *American Journal of Physics*, 77(11), 999-1009.
- Lindsey, B. A., Heron, P. R. L., y Shaffer, P. S. (2012). Student understanding of energy: Difficulties related to systems. *American Journal of Physics*, 80(2), 154-163.
- Lopes Coelho, R. (2009). On the concept of energy: how understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, 18, 961-983.
- López-Simó, V., y Couso, D. (2022). Un currículo operativo con 10 ideas clave sobre energía para construir a lo largo de la escolaridad. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 19(3), 1-15.
- Matthews, M. R. (2017). *History, philosophy and science teaching: New perspectives*. Springer.
- Maxwell, J. C. (1920). (1st edition 1877). *Matter and motion*. Society for Promoting Christian Knowledge.
- Mungan, C. E. (2007). Thermodynamics of a Block Sliding Across a Frictional Surface. *The Physics Teacher*, 45(5), 288–291.
- National Research Council. (2012). A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas. In *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For States, By States*, 1-2, 1–504. National Academies Press.
- Neumann, K., y Nordine, J. C. (2023). Energy. In *The International Handbook of Physics Education Research: Learning Physics* (pp. 4.1-4.34). AIP Publishing LLC.
- Ogborn, J. (1990). Energy, Change, Difference and Danger. *School Science Review*, 72(259), 81–85.
- Roche, J. (2003). What is potential energy? *European Journal of Physics*, 24(2), 185.
- Ruthven, K., Laborde, C., Leach, J., y Tiberghien, A. (2009). Design tools in didactical research: Instrumenting the epistemological and cognitive aspects of the design of teaching sequences. *Educational Researcher*, 38(5), 329–342.
- Sabo, H. C., Goodhew, L. M., y Robertson, A. D. (2016). University student conceptual resources for understanding energy. *Physical Review Physics Education Research*, 12(1), 10126.
- Seeley, L., Vokos, S., y Etkina, E. (2019). Examining physics teacher understanding of systems and the role it plays in supporting student energy reasoning. *American Journal of Physics*, 87(7), 510-519.
- Sherwood, B. A. (1983). Pseudowork and real work. *American Journal of Physics*, 51(7), 597–602.

- Solbes, J., Guisasola, J., y Tarín, F. (2009). Teaching Energy Conservation as a Unifying Principle in Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 265-274.
- Soto, M., Couso, D. y López, V. (2019). Una propuesta de enseñanza-aprendizaje centrada en el análisis del camino de la energía" paso a paso". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16(1), 1202.
- Tarsitani, C., y Vicentini, M. (1991). *Calore, energia, entropia*. Franco Angeli.
- Tiberghien, A., Vince, J., y Gaidioz, P. (2009). Design-based Research: Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, 31(17), 2275-2314.
- Tipler, P. A., y Mosca, G. P. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6th Edition). W.H.Freeman & Co Ltd.
- Tong, D., Liu, J., Sun, Y., Liu, Q., Zhang, X., Pan, S., y Bao, L. (2023). Assessment of student knowledge integration in learning work and mechanical energy. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 10127.
- Trellu, J.-L., y Toussaint, J. (1986). La conservation, un grand principe. *Aster: Recherches En Didactique Des Sciences Expérimentales*, 2(1), 43-87.
- Trumper, R., y Gorsky, P. (1993). Learning about energy: The influence of alternative frameworks, cognitive levels, and closed-mindedness. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(7), 637-648.
- UNESCO. (2017). Education for Sustainable Development Goals: learning objectives. In *Education for Sustainable Development Goals: learning objectives*. UNESCO.
- Wittmann, M. C., Millay, L. A., Alvarado, C., Lucy, L., Medina, J., y Rogers, A. (2019). Applying the resources framework of teaching and learning to issues in middle school physics instruction on energy. *American Journal of Physics*, 87(7), 535-542.
- Young, H. D., y Freedman, R. A. (2019). *University Physics with Modern Physics* (15th ed.). Pearson Education.