



Deficiencias de comprensión y epistémicas de los estudiantes universitarios en la construcción de categorías explicativas sobre las relaciones trabajo-energía

Understanding and epistemic deficiencies of university students in the construction of explanatory categories on work-energy relationships

José Gutiérrez-Berraondo

Escuela Universitaria de Ingeniería Dual-IMH, Elgoibar, Gipuzkoa, España,

jgutierrez@imh.eus

Kristina Zuza

Universidad del País Vasco, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, San Sebastián, Gipuzkoa, España.

kristina.zuza@ehu.eus

Genaro Zavala

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Monterrey, México.

genaro.zavala@tec.mx

Jenaro Guisasola

Universidad del País Vasco, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, San Sebastián, Gipuzkoa, España.

jenaro.guisasola@ehu.eus

RESUMEN • La comprensión del principio generalizado de trabajo y energía es crucial para aplicar las relaciones de trabajo y energía en cursos de física general y en la toma de decisiones de la ciudadanía en problemas relacionados con consumo y transferencia de energía y máquinas. Se ha diseñado un cuestionario de preguntas abiertas para detectar dificultades de aprendizaje de los estudiantes en los conceptos implicados. El análisis de las respuestas se ha realizado mediante la metodología fenomenográfica, que se centra en establecer categorías interpretativas a nivel colectivo. Los resultados obtenidos muestran que los estudiantes no comprenden el concepto de trabajo y de energía y no reconocen la necesidad de modelización del análisis mediante un sistema. Algunos errores son más frecuentes en situaciones que involucran fuerzas de rozamiento. Las dificultades se manifiestan tanto a nivel conceptual como epistemológico.

PALABRAS CLAVE: Relaciones energía y trabajo; Mecánica newtoniana; Dificultades de aprendizaje; Cursos de física general en universidad.

ABSTRACT • The understanding of the generalized principle of work and energy is crucial to apply the relationships of work and energy in introductory physics courses and in the decision-making of the citizens in problems related to consumption and transfer of energy and machines. A questionnaire with open questions has been designed to detect students' learning difficulties. The analysis of the responses has been carried out using the phenomenographic methodology, which focuses on establishing interpretive categories at the collective level. The results obtained show that the students do not understand the concept of work and energy and do not recognize the need for modeling the analysis when defining a system. Some errors are more frequent in situations involving friction forces. Difficulties appears both at the conceptual and epistemological levels.

KEYWORDS: Energy and work relationships; Newtonian mechanics; Learning difficulties; General physics courses at university.

Recepción: abril 2020 • Aceptación: septiembre 2020

INTRODUCCIÓN

Los conceptos de trabajo y energía y las relaciones entre ellos en el área de la mecánica newtoniana es un tema fundamental en el plan de estudios de Física General en cursos de ciencias e ingeniería y en el Bachillerato. Es un tema del currículum donde los estudiantes necesitan recurrir a sus conocimientos sobre conceptos básicos de la mecánica newtoniana, como el concepto de fuerza y las leyes de Newton (Jewett, 2008c). Asimismo, los temas relacionados con energía y trabajo constituyen un elemento fundamental en la alfabetización científica de la ciudadanía, para que esta pueda tomar decisiones fundamentadas sobre el desarrollo social (Driver y Warrington, 1985). Por ambas razones, el conocimiento de las dificultades de los estudiantes, no solo en cursos de educación secundaria (Trumper, 1993) sino también en la etapa de formación de profesionales en ciencias e ingeniería, es crucial para el diseño de un currículum sobre el tema de «Trabajo y Energía» a lo largo de las diferentes etapas educativas.

Investigaciones previas muestran que los estudiantes presentan dificultades en la comprensión de los conceptos de trabajo mecánico y energía en cursos de física de secundaria y en el primero de universidad (Bächtold y Guedj, 2014). La mayoría de los estudios se han llevado a cabo en niveles preuniversitarios (Trumper, 1993; Doménech et al., 2007) y muy pocos a nivel universitario (Lindsey, Heron y Shaffer, 2009; Lindsey, Heron y Shaffer, 2012; Gutiérrez-Berraondo, Zuza, Zavala y Guisasola, 2018). Es razonable pensar que es particularmente necesario seguir analizando la comprensión de los estudiantes universitarios sobre estos conceptos que permita mejorar el conocimiento sobre la enseñanza de este tema.

En cursos introductorios de física para universitarios de ciencias e ingeniería, los estudiantes trabajan el principio generalizado del trabajo y energía (en adelante, PGTE) a partir de la introducción de los conceptos de trabajo y energía. En el programa que presentan los libros de texto más utilizados en física general de grados en ciencias e ingeniería, los estudiantes comienzan estudiando el concepto de trabajo para luego establecer el teorema de la energía cinética. Posteriormente, se introduce la energía potencial y su relación con el trabajo (Tipler y Mosca, 2005; Young y Freeman, 2009). Sin embargo, Bächtold y Guedj (2014) muestran que la enseñanza tradicional se centra en definiciones operativas de los conceptos de trabajo y energía, así como en examinar los efectos de las fuerzas en relación con el cambio de energía para situaciones particulares en las que solo hay cambio de la energía cinética y/o energía potencial gravitatoria. Ello puede llevar a que haya un énfasis excesivo en la información particular a costa de relaciones más generales (Doménech et al., 2013). Estas investigaciones, entre otras, parecen indicar que hay un problema en la enseñanza de los conceptos de trabajo y energía y, en particular, en el PGTE.

Este estudio añade a la investigación previa sobre dificultades de los estudiantes en la comprensión de los conceptos de trabajo y energía el tema de la comprensión de las relaciones entre trabajo y energía mediante el PGTE y, además, se centra en el nivel universitario para primeros cursos de física general en grados de ciencias e ingeniería.

Es necesario indicar que el trabajo que presentamos es parte de un proyecto de investigación más amplio que incluye una secuencia de enseñanza/aprendizaje del tema «Trabajo y Energía» en cursos universitarios de física general. Aprender más sobre las concepciones de los estudiantes y sus características en este tema es necesario para apoyar nuevos programas de enseñanza basados en las metodologías activas propuestas por los currículos actuales en la enseñanza de las ciencias (Tahirsylaj, Niebert y Duschl, 2016).

Este artículo describirá en primer lugar trabajos anteriores que inspiraron las preguntas de esta investigación. En segundo lugar, explicará el marco teórico para diseñar los instrumentos de investigación. Finalmente, mostrará los resultados obtenidos y la evidencia de las categorías definidas.

ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LAS DIFICULTADES DE LOS ESTUDIANTES EN LA COMPRESIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE TRABAJO Y ENERGÍA

La investigación en enseñanza de la física ha mostrado reiteradamente que los estudiantes tienen dificultades de comprensión en el tema de trabajo y energía en mecánica newtoniana en niveles de secundaria y universidad (Duit, 1981; Trumper, 1993; Dawson-Tunik y Stein, 2008; Jewett, 2008c; Duit, 1986). A continuación, describimos las dificultades sobre el concepto de trabajo y las relaciones entre trabajo y energía.

Dificultades de comprensión del concepto de trabajo

La bibliografía advierte de las «sutilezas» del concepto actual de trabajo y sus características (Besson, 2001; Erlichson, 1977; Lindsey et al., 2009; Penchina, 1978). El concepto de trabajo depende del concepto de fuerza y se debe hacer un esfuerzo considerable para diferenciar el concepto científico de trabajo del significado cotidiano de la palabra. El trabajo se define como el producto escalar entre dos magnitudes vectoriales. Pero su significado implica considerar el trabajo como una forma de cambiar la energía de un sistema y, por ello, la magnitud de trabajo tiene la misma unidad que la magnitud de energía. Así, la definición operativa de trabajo indica la cantidad del cambio de energía producido. Diferentes autores coinciden en que se requiere un análisis detallado de los procesos donde el trabajo está involucrado (Hicks, 1983). Se debe tener en cuenta que, si bien la energía está asociada con los sistemas, el trabajo se define en las transformaciones de las energías involucradas, y por lo tanto no tiene mucho sentido asociarlo con un sistema (Tarsitani y Vicentini, 1991).

La primera dificultad que presentan los estudiantes a la hora de comprender el concepto de trabajo se debe al lenguaje utilizado cuando se define dicha magnitud. A la hora de explicar en clase el concepto de trabajo se deben evitar expresiones que sean incompletas. Por ejemplo, Jewett (2008b) indica: «The phrase: the hammer exerted a force, is incomplete. It is important to specify what is applying the force and what the force is applied on: the force of the hammer on the nail, the force exerted by the surface on the foot and the like» (p. 149).

Mallinckrodt y Leff (1992), al analizar la definición de trabajo en muchos libros de texto, encuentran que se presenta en seguida la ecuación $W = \mathbf{F} \times \Delta \mathbf{r} = F \Delta r \cos \theta$, y se utilizan expresiones generales como: « Δr es el desplazamiento del objeto» o simplemente «el desplazamiento», sin identificar qué es lo que se desplaza, lo que dificulta la comprensión de los estudiantes. En el mismo sentido, la falta de concreción en la definición de trabajo lleva a que los estudiantes tengan dificultades conceptuales, cuando se encuentran frente a situaciones en las que aparecen fuerzas de fricción o fuerzas que actúan sobre cuerpos deformables, o bien cuerpos que tienen un movimiento de rotación (Besson, 2001; Jewett, 2008d). Otra dificultad relacionada con el cálculo del trabajo surge cuando actúan varias fuerzas sobre el sistema. En estos casos es necesario discutir cómo calcular el trabajo realizado por la fuerza neta (Sherwood, 1983).

Dificultades de comprensión de las relaciones energía-trabajo

La bibliografía de investigación en enseñanza de la física muestra que la alta abstracción del concepto de energía, así como sus múltiples significados en la vida cotidiana, hacen de la energía un concepto difícil de definir (Trumper, 1993 y Beynon, 1990). El concepto de energía ha tenido que superar a lo largo de la historia dificultades asociadas a su comprensión en el marco teórico de la física (Dawson-Tunik y Stein, 2008). En ocasiones, el término *energía* se asocia a una «sustancia» que se consume o transforma. Por ejemplo, los estudiantes suelen confundir los términos *energía* y *calor* (Jewett, 2008b;

Romer, 2001; Bauman, 1992). En algunos libros de texto se encuentran expresiones del tipo «pérdida de calor», lo que puede generar confusión en los estudiantes al aplicar el principio de conservación de la energía. En la actualidad, la energía se define como una propiedad de un sistema en una condición específica (una propiedad del estado del sistema), no una sustancia material, o la «capacidad» de un sistema para realizar un trabajo (Ding, Chabay y Sherwood, 2013). Durante el siglo XIX se propuso presentar el concepto de energía como «la capacidad para trabajar» (Warren, 1982). Pero esta definición está limitada a algunos casos de la mecánica, ya que, al enunciar el segundo principio de la termodinámica, se puede ver que no toda la energía es capaz de transformarse en trabajo (Duit, 1986; Hicks, 1983; Sexl, 1981; Trumper, 1990). Además, la idea cualitativa de la energía como la capacidad para producir cambios no parece ser epistemológicamente apropiada, ya que un proceso se produce debido al aumento de entropía, y no a las variaciones en la energía (Chrisholm, 1992; Gailunas, 1988). En consecuencia, en el marco teórico de la física clásica, la energía se considera una magnitud asociada con un sistema que puede tomar diferentes formas y que se puede transformar y transferir (Boohan y Ogborn, 1996; Tarsitani y Vicentini, 1991; Mallinckrodt y Leff, 1992).

Otro aspecto para el que los estudiantes tiene especial dificultad de aprendizaje es el relacionado con la «transferencia» y la «transformación» de energía (Bauman, 1992; Jewett, 2008c). Asimismo, la bibliografía subraya la necesidad de explicitar en la enseñanza que, en los casos en los que hay transferencia de energía, aparecen en el proceso magnitudes como trabajo, calor y radiación electromagnética (Chabay, Sherwood y Titus, 2019).

Frecuentemente, las relaciones entre trabajo y energía se presentan a través de varios capítulos del programa (Fishbane, Gasiorowicz y Thornton, 1994; Tipler y Mosca, 2005). Esto puede llevar a los estudiantes a pensar que existen varias ecuaciones fundamentales de la energía. La investigación didáctica ha mostrado que las presentaciones de situaciones particulares (un solo tipo de fuerza, sin rozamiento, etc.) deben ser explícitamente acotadas (Erlichson, 1977; Pechina, 1978; Sherwood, 1983; Sherwood y Bernard, 1984; Mallinckrodt y Leff, 1992; Mungan, 2005a). Los libros de texto no suelen ser muy explícitos en las simplificaciones que se realizan y los significados de los nuevos términos que se utilizan en el análisis de situaciones con cuerpos extensos, donde se utiliza el concepto de centro de masas en situaciones de cuerpos deformables o en movimientos de un sólido rígido en rotación (Jewett, 2008d; Sherwood, 1983; Mallinckrodt y Leff, 1992; Mungan, 2005a; Pechina, 1978; Sherwood, 1983; Sherwood y Bernard, 1984).

De acuerdo con los estudios previos revisados, pocos estudios se centran en las dificultades de los estudiantes sobre relaciones entre trabajo realizado por/en el sistema y la variación de energía al aplicar el PGTE en un sistema de partículas, y menos aún en el nivel universitario. Por ello, la pregunta de investigación de este trabajo se enuncia como: ¿Cuáles son las dificultades de los estudiantes universitarios en cursos introductorios de física sobre la comprensión del principio generalizado del trabajo y la energía?

MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

La metodología de investigación utilizada para responder a la pregunta de investigación comparte los supuestos de la teoría social-constructivista del aprendizaje, entendido como «construir-conocimiento», e identifica las formas de expresión escrita y oral como instrumentos de medición entre el plano social y el personal (Vygotsky, 1978; Driver, 1989; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994; Taber, 2006; Leach y Scott, 2008). El trabajo se basa en un enfoque del aprendizaje en términos de desarrollar un razonamiento causal complejo y un proceso de modelización riguroso (Scott, Asoko y Leach, 2008). El avance en el proceso de aprendizaje se constata con evidencias empíricas sobre la frecuencia con que aparecen las concepciones alternativas y las diferentes formas de razonamiento en el discurso escrito

y oral de los estudiantes en clase, y en cómo el profesorado controla las estrategias de enseñanza para apoyar el aprendizaje de los estudiantes (Ogborn, Kress y Martins, 1996).

De acuerdo con el marco teórico descrito, se ha diseñado un cuestionario de preguntas abiertas (en el anexo se describen tres de las cuestiones) que han sido la fuente principal de toma de datos para indagar sobre las dificultades que presentan los estudiantes. Los estudiantes tienen que utilizar un «razonamiento creativo» basado en los contenidos científicos de la tarea, frente a un «razonamiento imitativo» (razonamiento memorizado, recordar un algoritmo y calcular la respuesta) basado en propiedades superficiales de la tarea (Mestre, Thaden-Koch, Dufresne y Gerace, 2004; Lithner, 2008). Además, debido a que la investigación ha detectado la dependencia de las respuestas de los estudiantes con el contexto en que se realiza la pregunta, se utiliza una variedad de cuestiones en diferentes contextos con el mismo objetivo para indagar sobre lo que entienden los estudiantes. En las «concepciones de los estudiantes» no solo se describen la interpretación de los alumnos sobre los fenómenos objeto de estudio, sino también los procedimientos que utilizan para llegar a comprenderlos (Vosniadou, 2012). Las respuestas escritas de los estudiantes revelan su pensamiento y pueden ampliar nuestro conocimiento sobre los procesos de comprensión de los fenómenos que se analizan. Es conocido que el análisis de las respuestas escritas se ha utilizado frecuentemente para obtener el nivel de comprensión de los estudiantes (Rivard, 1994), pero también se ha utilizado a menudo para categorizar los procesos de comprensión de nuevos conceptos o de la utilización de procedimientos (Prain y Hand, 1999).

Con relación al análisis de las respuestas, somos conscientes de que diferentes técnicas utilizadas en la investigación han dado lugar a resultados diferentes (Duit, Treagust y Mansfield, 1996). La consistencia de estos resultados es un tema que debe ser tenido en cuenta en la investigación sobre dificultades y razonamientos de los estudiantes (Engel Clough y Driver, 1986; Marton, 1981). Para afrontar este problema, en las últimas décadas se ha propuesto la metodología llamada «Fenomenografía», que se utiliza para describir y explicar la variación en las concepciones de los estudiantes (Marton, 1981; Marton y Booth, 1997). El enfoque de investigación fenomenográfica investiga «las diferentes formas cualitativas en que las personas experimentan, conceptualizan, perciben y entienden diversos aspectos de los fenómenos naturales» (Marton, 1981). Marton y Booth (1997) dicen que «en la fenomenografía los individuos son vistos como portadores de diferentes formas de experimentar un fenómeno y como portadores de fragmentos de diferentes formas de experimentar este fenómeno» (Marton y Booth, 1997, p. 114). Las descripciones de los estudiantes alcanzan una dimensión colectiva y, en ese sentido, las que son individuales son rechazadas. La fenomenografía asegura que diferentes formas de percibir y entender la realidad (conceptos y formas conexas de razonamiento) pueden ser considerados como categorías que describen la realidad. Estas categorías se pueden observar entre un gran número de personas, y por lo tanto todas estas representaciones juntas indican un tipo de inteligencia colectiva. «Las mismas categorías de descripción aparecen en diferentes situaciones. El conjunto de categorías es, pues, estable y puede ser aplicado, incluso si los individuos se mueven de una categoría a otra en diferentes ocasiones» (Marton, 1981, p. 195; Marton y Booth, 1997).

El análisis fenomenográfico se ha publicado en la literatura en diferentes trabajos, que intentan describir las formas cualitativamente diferentes en las cuales los individuos conciben diversos fenómenos. En investigaciones de enseñanza de la física se han publicado tanto métodos cualitativos con entrevistas, como semicuantitativos con cuestionarios (Bowden et al., 1992; Watts, Gould y Alsop, 1997; Ebenezer y Fraser, 2001; Zuza et al., 2013).

CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Para indagar sobre las ideas alternativas de los estudiantes en el tema de trabajo y energía en física general de primer curso para ciencias e ingeniería en la Universidad, se ha diseñado un cuestionario con preguntas abiertas (véase anexo). Para la validación de las preguntas, en primer lugar, se sometió el objetivo de cada pregunta al juicio de tres profesores de física de primer año de Ingeniería que estuvieron de acuerdo con los contenidos y propusieron algunos cambios. Se realizó una nueva versión del cuestionario, en la que se recogían las sugerencias de redacción, pero sin variar su objetivo principal. Con esta nueva versión se realizó un estudio piloto con 30 estudiantes de primer año. El estudio piloto confirmó que los estudiantes no tenían problemas para entender cómo se formularon las preguntas.

La nueva versión es la que se pasó a una muestra de 148 estudiantes dos semanas después de haber estudiado el tema de «Trabajo y Energía» en los cursos académicos 2015-2016 y 2016-2017. Todos los estudiantes son del primer curso de Ingeniería de la asignatura de Física, en la Universidad del País Vasco. La muestra está compuesta por estudiantes del primer curso de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa y la Escuela de Ingeniería dual IMH, ambas pertenecientes a la UPV/EHU, y está formada por un 87 % de hombres y un 13 % de mujeres, con edades comprendidas entre los 18 y 20 años. Todos los estudiantes han superado la prueba de acceso a la Universidad para los grados de ciencias e ingeniería. Se presentan los resultados de los dos cursos agrupados, ya que no hay diferencias estadísticamente significativas en las frecuencias para cada categoría (se aplicó el estadístico chi cuadrado).

A la hora de categorizar las respuestas de acuerdo con los criterios fenomenográficos, se codificaron los comentarios reconocidos como «una explicación», basados en categorías con rasgos fácilmente reconocibles, como declaraciones científicas y argumentación (Cortazzi, 1993). Esto implicó que un miembro del equipo de investigación leyera las respuestas de los estudiantes y derivara un borrador de categorías de descripción para cada pregunta. A continuación, otros dos investigadores analizaron las respuestas de los estudiantes y asignaron tentativamente cada respuesta a una de las categorías del borrador. Una vez clasificadas las respuestas, se compararon las asignaciones de respuesta y se alcanzó un grado de acuerdo muy significativo con un coeficiente de confiabilidad de la kappa de Cohen de 0,87. Cualquier desacuerdo sobre la descripción de la categoría o asignación de respuestas se resolvió al referirse a las respuestas como la única evidencia de la comprensión de los estudiantes. Se utilizó un proceso iterativo para definir las categorías finales (Marton y Booth, 1997).

Las tres cuestiones indagan en torno a dos aspectos de las relaciones entre los conceptos de trabajo y energía: el campo de validez del teorema de la energía cinética y la aplicación del PGTE a sistemas en diferentes contextos. La primera cuestión (C1) tiene como objetivo principal indagar sobre las ideas que los estudiantes presentan respecto al campo de validez del teorema de la energía cinética.

La segunda cuestión (C2) tiene como objetivo indagar si los estudiantes identifican las fuerzas externas e internas que actúan en un sistema concreto (los sistemas posibles son coche, coche-tierra, coche-superficie carretera, coche-tierra-superficie carretera) y cómo lo aplican en el PGTE. En este caso, los estudiantes deben comprender que la variación de energía interna en el sistema se debe al trabajo realizado por las fuerzas internas y es, por lo tanto, la responsable de la disminución de la energía cinética del coche (Erlichson, 1977). El cálculo del trabajo realizado por las fuerzas internas de un sistema es complejo y difícil de realizar (Besson, 2001), por lo que no se solicitan cálculos concretos, sino el balance global de la energía según el PGTE. La cuestión no solicita que los estudiantes recuerden el PGTE, ya que en la propia pregunta se les indica su definición operativa, sino que lo apliquen a un contexto determinado. Los estudiantes, al elegir el sistema coche, deben tener en cuenta dos cuestiones clave. La primera es que la fuerza de rozamiento entre el asfalto y los neumáticos es una fuerza de rozamiento estática y por lo tanto no realiza ningún trabajo. El segundo punto clave es que los estudiantes

deben de considerar las fuerzas de rozamiento internas al sistema, esto es, los mecanismos internos del coche, y considerar que estas fuerzas de rozamiento internas hacen aumentar la energía interna del coche y disminuir su energía cinética.

La tercera cuestión (C3) está orientada a indagar cómo aplican el PGTE a diferentes sistemas. Los estudiantes deben entender, en primer lugar, que se pueden definir diferentes sistemas en un mismo fenómeno. En la cuestión se les propone dos sistemas diferentes: «bloque» y «bloque-muelle». En segundo lugar, los estudiantes deben tener en cuenta que en ambos sistemas se cumple el PGTE y deben tener adquiridas las habilidades científicas necesarias para aplicar dicho principio de manera equivalente para ambos sistemas.

En la tabla 1 se resumen los objetivos que se han comentado para cada una de las cuestiones planteadas.

Tabla 1.
Objetivos de las tres cuestiones

<i>Cuestiones</i>	<i>Objetivos</i>
C1. Teorema de la energía cinética	Identificar las condiciones de validez del teorema de la energía cinética.
C2 y C3. Aplicación de PGTE en diferentes situaciones	Aplicar correctamente el PGTE con relación al sistema elegido, que incluye su definición explícita y la definición de la fuerzas externas e internas a este.

RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de las respuestas dadas por los estudiantes a las tres cuestiones, que se han agrupado en diferentes categorías de acuerdo con la metodología fenomenográfica descrita en la sección 3. En las tablas 2 y 3 se presentan las diferentes categorías de respuestas a las tres preguntas del cuestionario.

Tabla 2.
Porcentaje de respuestas de cada categoría de la cuestión C1

<i>Categorías</i>	<i>Porcentaje de estudiantes (N = 148)</i>
A. *Reconoce el campo de validez del teorema	29,5
A.1. Argumentos basados en explicaciones generales	11,5
A.2. Argumentos basados en casos particulares	18
B. No reconocen la validez general del teorema, pero ofrecen argumentos incorrectos en relación con el marco teórico de la física	12,5
C. Ofrecen argumentos incorrectos para justificar la validez general del teorema	17,5
Incoherentes	17,5
No contesta	23,0

(*) Respuesta que se considera correcta en este nivel académico.

Casi el 30 % de las respuestas de los estudiantes se clasifican en la categoría A. En esta categoría A, el 11,5 % del total de respuestas explican que el teorema de la energía cinética solo se aplica a sistemas formados por una partícula, de manera que el único tipo de energía es la cinética y, por tanto, se establece una relación entre el trabajo realizado sobre el sistema y la variación de dicha energía. Un par de ejemplos de respuesta de esta categoría serían los siguientes:

Sería válida siempre y cuando en el sistema que tomemos haya sólo una partícula. Al tener una sola partícula no habrá variación de Energía Potencial, ya que no habría fuerzas internas que realizan trabajo (Estudiante 74).

No es válida para cualquier transformación que se analice, ya que, si tenemos un sistema compuesto por dos objetos, si el W_{ext} es cero, puede haber variación de energía potencial dentro del sistema (Estudiante 65).

Dentro de la categoría A, se han incluido también respuestas (18 % del total de respuestas) que ponen ejemplos concretos donde aparecen otro tipo de energía (diferentes tipos de energía potencial), que rechazan la afirmación de la cuestión. Un ejemplo estándar:

No, porque si en una grúa un peso que está a 20 metros lo subes a 50 metros a velocidad constante, el trabajo no es ΔE_c , sino ΔE_p (Estudiante 77).

En la categoría B, algo más del 10 % de las respuestas explican que el teorema de la energía cinética tiene un campo de validez limitado, pero presentan argumentos incorrectos desde el punto de vista del marco teórico. A continuación, se muestran las respuestas con los errores más comunes sobre la relación fuerza y velocidad y sobre la confusión en la definición de trabajo:

No es siempre válida. Por ejemplo, si una partícula se mueve con velocidad constante, tendremos que $\Delta K = 0$, pero sabemos que ha habido un trabajo porque ha habido una velocidad, pero $V = cte$, $\Delta K = 0$, $W_{tot} \neq 0$ (Estudiante 56).

No tienen validez general. Por ejemplo, se realiza trabajo al aplicar una fuerza sobre un objeto que no se mueve. Entonces no hay variación de energía cinética pero sí se realiza un trabajo (Estudiante 118).

En la categoría C (casi el 20 %) se han agrupado explicaciones que razonan según un ejemplo particular, pero no establecen el campo de validez. Ejemplo para esta categoría:

Sí, el trabajo siempre es la variación de la energía cinética. En una competición el cambiar la velocidad del corredor le supone un trabajo y este trabajo suele ser la variación de energía cinética (Estudiante 87).

En la categoría «Incoherentes» se han agrupado respuestas que no presentan una coherencia lógica en los argumentos. Un ejemplo de este tipo de respuestas:

El trabajo siempre es la variación de la energía cinética, pero también puede haber variación de energía potencial. El teorema se cumple siempre (Estudiante 52).

Con relación a las cuestiones C2 y C3, ver los resultados en la tabla 3.

Tabla 3.
Porcentaje de respuestas de cada categoría de las cuestiones C2 y C3

<i>Categorías</i>	<i>C2. Porcentaje de estudiantes (N = 148)</i>	<i>C3. Porcentaje de estudiantes (N = 148)</i>
A. *Aplican el PGTE de forma coherente al sistema definido	25,5	10,0
B. La aplicación del PGTE no es coherente con el sistema definido o no se define el sistema.	39,5	46,5
C. Utilización incorrecta de los conceptos implicados	16,0	13,0
No contesta	19,0	30,5

(*) Respuesta que se considera correcta en este nivel académico.

En la cuestión C2, una cuarta parte de los estudiantes (categoría A) comprenden que se debe definir, en primer lugar, un sistema para analizar el fenómeno y, en segundo lugar, aplicar a dicho sistema el balance energético de acuerdo con el PGTE. En esta categoría muy pocos estudiantes consideran la fuerza de rozamiento como una fuerza interna cuyo trabajo causa la disminución de la velocidad. Un ejemplo de uno de los dos estudiantes es el siguiente:

Defino el sistema como el formado por el coche. En este sistema no hay fuerzas exteriores ($W_{ext} = 0$), pero sí hay fuerzas internas de rozamiento en los engranajes del coche ($\Delta U_{interna} \neq 0$). Además, no hay energía potencial gravitatoria o elástica, por tanto, si aplicamos el principio $E_i + W_{ext} = E_f + \Delta U_{interna}$, nos queda: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = \Delta U_{interna}$. Es el trabajo realizado por fuerzas internas (variación de energía interna), la que hace frenar el coche (Estudiante 28).

El resto de explicaciones de la categoría A hacen referencia a la aplicación de fuerzas externas al sistema, cuyo trabajo hace que el coche frene y disminuya la energía cinética del sistema. Un ejemplo de respuesta estándar de la categoría A, que se ha considerado como suficientemente correcta es cuando los estudiantes se refieren a una «fuerza externa», que dibujan en contra del movimiento y que actúa sobre el sistema, pero no concretan el sistema y/o no concretan la naturaleza de la fuerza. Un ejemplo de respuesta es la siguiente:

En este caso las energías potenciales (gravitatoria, elástica) son cero, la energía cinética varía. Hay una fuerza externa del viento contra el coche que hace un trabajo externo que frena el coche (dibuja un vector fuerza sobre el coche en sentido contrario al movimiento). Entonces, la energía cinética final sea cero ($W_{ext} \neq 0$). No hay variación de energía interna. Por tanto, el principio $E_i + W_{ext} = E_f + \Delta U_{interna}$. Es: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + W_{ext} = 0$ (Estudiante 94).

En el caso de la cuestión C3, se observa que muy pocas respuestas (10 %) aplican correctamente el PGTE a los dos sistemas planteados (sistema «bloque» y sistema «bloque-muelle»). Un ejemplo representativo de la categoría A para la C3:

En el sistema «bloque» hay una fuerza externa del muelle sobre el bloque que hace un trabajo, pero no hay fuerzas internas, no hay energía potencial. La energía cinética es cero al comienzo, pero en el $x=0,4$ hay una velocidad v . Si aplico el principio $E_i + W_{ext} = E_f + \Delta U_{interna}$, tenemos: $0 + W_{ext} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + 0$ y el trabajo externo es el realizado por la fuerza del muelle $F=-kx$ durante $Dx = 0,3$ m.

Para el sistema «bloque-muelle», no hay fuerzas internas, pero sí hay energía potencial del muelle. Por tanto: $\frac{1}{2} k 0,7^2 + 0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} k 0,4^2$ (Estudiante 143).

Aproximadamente, entre el 40 y el 50 % de las explicaciones de las cuestiones C2 y C3 (categoría B) no definen explícitamente el sistema donde aplican el PGTE (cuestión C2), o bien no aplican el PGTE a varios sistemas de un mismo fenómeno (cuestión C3). En la cuestión C2, las respuestas de la categoría B (40 %) no definen el sistema, y consideran que las fuerzas de rozamiento son fuerzas externas al sistema y que hacen un trabajo que reduce la velocidad inicial del coche, lo que lleva a conclusiones erróneas. En los libros de texto, en mecánica, siempre consideran el trabajo de rozamiento como trabajo realizado por fuerzas internas al sistema, ya que es imposible conocer qué parte del trabajo contribuiría a variar de energía cinética del coche y qué parte contribuiría a variar la energía en forma de calor que se pudiera intercambiar desde el sistema al entorno (Mugan, 2005; Besson, Borghi, De Ambrosis y Mascheretti, 2007). La no elección del sistema parece llevar a que los estudiantes construyan argumentos generales que no se concretan en la ecuación del PGTE. Un ejemplo estándar:

Entendemos que el coche comienza con una energía cinética ya que tiene una velocidad v_1 , entiendo que esa energía cinética se va disipando más bien transformando en fuerza de rozamiento cada vez mayor, de tal forma que termina disminuyendo la velocidad hasta llegar a 0. Mientras que la fuerza de rozamiento va frenando el coche (Estudiante 98).

El coche al pasar de t_1 a t_2 cambia de energía ya que en t_1 va con una velocidad y al llegar al t_2 no tiene, eso es por el rozamiento que tiene la carretera, lo que hará que el coche vaya disminuyendo la velocidad hasta que sea 0. En el instante t_1 el coche está con energía cinética y al final el coche acabará sin energía ya que está parado (Estudiante 76).

Casi la mitad de las respuestas (46,5 %) de la cuestión C3 se encuentran en la categoría B. La gran mayoría de explicaciones contestan a la pregunta analizando solo el sistema «bloque-muelle», que es el más utilizado en los libros de texto, pero ignoran el otro sistema. Ejemplos de esta categoría B para la C3 son los siguientes:

En el sistema formado por el bloque y el muelle, la variación de energía potencial elástica es igual a la variación de energía cinética: $\Delta E_{\text{clas.}} = E_{\text{clas2}} - E_{\text{clas1}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 = \Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$ (Estudiante 110).

La energía del muelle es $E = 1/2 KX^2$ por lo tanto la energía del sistema no depende la masa en los dos casos la energía del sistema $E = 1/2 \cdot 5 \cdot (7-4)^2 = 22, 5 \text{ J}$ (Estudiante 7).

Alrededor del 15 % de los estudiantes (categoría C) establecen relaciones erróneas entre conceptos. Por ejemplo, respuestas que relacionan la energía cinética con la naturaleza conservativa de la fuerza, o bien confusión entre las fuerzas y el trabajo que realizan, al explicar que la fuerza causa variación de energía. La literatura indica que este tipo de razonamientos responden a aprendizajes memorísticos mal asimilados (Viennot, 2001). Así mismo, hay un porcentaje importante de estudiantes que no contestan, lo que muestra la alta dificultad que tienen los estudiantes en analizar fenómenos relacionados con el balance de trabajo y energía en ejercicios estándar de mecánica clásica.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo hemos ilustrado algunas de las dificultades que pueden suponer barreras para el desarrollo de una comprensión funcional de la conservación de la energía en mecánica para cursos introductorios de física en la universidad. Las dificultades que hemos descrito incluyen tanto dificultades de comprensión de conceptos como dificultades epistemológicas de justificación de la aplicación del PGTE.

Con relación al objetivo del estudio de indagar sobre dificultades de los estudiantes en la comprensión de las relaciones entre trabajo y energía mediante el PGTE, se ha mostrado que el 12,5 y el 16-13 % (tabla 2 categoría B y tabla 3 categoría C) utilizan significados erróneos sobre el concepto de trabajo de una fuerza o de la definición de los tipos de energía. Las dificultades de comprensión del concepto de trabajo confirman lo encontrado en un estudio internacional previo de este proyecto (Gutiérrez-Berraondo, Zuza, Zavala y Guisasola, 2018) y otros estudios internacionales (Jewett, 2008d; Bächtold y Guedj, 2014). El 55 % en la cuestión C2 y el 59,5 % en la cuestión C3 (tabla 3 categorías B y C) confunden la influencia del trabajo realizado por una fuerza en la variación de energía del sistema con la influencia de la fuerza en el sistema.

En relación con las dificultades epistemológicas al aplicar los conceptos de trabajo y energía en el balance definido por el PGTE, los resultados muestran dos tipos de dificultades. Con relación al teorema de la energía cinética, el 17,5 % de los estudiantes (tabla 2, categoría C cuestión C1) tienden a justificar el enunciado de acuerdo con las características de un ejemplo particular, teniendo en cuenta sus características superficiales y realizando una sobregeneralización de lo particular a lo general (Larkin y Rainard, 1984). Una segunda deficiencia epistemológica que muestra el análisis de las cuestiones C2 y C3 es que la gran mayoría de estudiantes no tiene en cuenta que la aplicación del PGTE solo es válida en un sistema previamente elegido, sea cual sea (Arons, 1999). Al analizar las respuestas de la cuestión C3 se constata que los estudiantes no diferencian entre posibles sistemas diferentes a la hora

de desarrollar estrategias de resolución del problema (véase tabla 3 categoría B). Esta tendencia a no analizar el sistema donde se aplica el PGTE puede ser debida, en parte, a que en la instrucción se analiza solo el sistema más adecuado en cada contexto y los estudiantes se habitúan a resolver los ejercicios definiendo un solo sistema o sin definirlo explícitamente al comenzar la aplicación del PGTE (Lindsey, Heron y Shaffer, 2009). Así mismo, al analizar las respuestas de los estudiantes a la cuestión C2 se puede observar que el 39,5 % de las respuestas (tabla 3, categoría B en cuestión C2) consideran la fuerza de rozamiento una fuerza externa, pero no definen el sistema de aplicación del PGTE. Esta falta de definición del sistema lleva a que las conclusiones del análisis sean erróneas. Estos resultados indican que los estudiantes no practican uno de los procedimientos básicos de la práctica científica al analizar problemas de energía, la modelización cualitativa del fenómeno en un marco abstracto definido con el nombre de «sistema». Esta deficiencia epistémica también se ha encontrado en otras investigaciones a nivel internacional (Lindsey, Heron y Shaffer, 2009; Papadouris, Contantinou y Kyratsi, 2008).

Las similitudes en algunos de los resultados de este estudio con resultados obtenidos en investigaciones a nivel internacional (Jewett, 2008d; Bächtold y Guedj, 2014; Lindsey, Heron y Shaffer, 2009; Papadouris, Contantinou y Kyratsi, 2008) parecen indicar que el nuevo conocimiento obtenido podría indicar algunas tendencias generales en las dificultades de los estudiantes. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el estudio se ha realizado para una muestra relativamente pequeña y en solo dos centros de educación superior. Esto implica limitaciones para el estudio, que deberá ser contrastado con muestras más amplias y en contextos de educación de diferentes países.

Muchos profesores de Física son conscientes de que la elección de «un sistema» al analizar la relación trabajo y variación de energía (PGTE) no siempre se hace explícita a los estudiantes, y que el uso informal de expresiones que asocian energía potencial con un objeto en lugar de un sistema es común. Podría pensarse que en general no es una cuestión que influye en el aprendizaje, porque a menudo se pueden obtener las soluciones correctas a los problemas que presentan los libros de texto de bachillerato y universidad, a pesar de la falta de precisión en la discusión de los sistemas. Sin embargo, nuestros resultados revelan que las inconsistencias al considerar los sistemas pueden tener serias implicaciones en el aprendizaje para estudiantes de primer curso de educación superior. También las diferencias en las respuestas correctas cuando se consideran fuerzas de rozamiento y cuando no advierten de la práctica común en la enseñanza de no tratar el PGTE como un principio válido para el análisis del balance energético de cualquier sistema. Los resultados muestran que puede ser perjudicial presentar el teorema de la energía cinética y la conservación (o no conservación en el caso de que hubiera fuerzas de rozamiento) de la energía mecánica como leyes que aplicar en casos particulares y sin conexión.

Los resultados del estudio sugieren que la enseñanza del tema debería resaltar la elección del sistema donde se aplica el PGTE, así como que este se cumple en cualquier sistema elegido para una misma situación o fenómeno. Así mismo, los resultados indican la conveniencia de relacionar explícitamente todos los casos particulares que se derivan del PGTE. También sería conveniente presentar el teorema de la energía cinética, la conservación de la energía cinética y potencial, y la conservación de la energía mecánica como relaciones derivadas del PGTE, de forma que los estudiantes podrán analizar la coherencia del principio para diferentes situaciones de la mecánica newtoniana.

Los resultados que hemos encontrado, para estudiantes de primer curso de universidad, indican que las dificultades no se limitan al nivel de secundaria. También sugieren que será necesario tener en cuenta estas dificultades en propuestas basadas en la investigación que pretendan mejorar el aprendizaje en este tema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arons, A. B. (1999). Development of energy concepts in introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 67(12), 1063-1067.
<https://doi.org/10.1119/1.19182>
- Bächtold, M. y Guedj, M. (2014). Teaching Energy Informed by the History and Epistemology of the Concept with Implications for Teacher Education. En M. R. Matthews (Ed.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (pp. 211-243). Dordrecht / Bruselas: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_8
- Bauman, R. H. (1992). Physics that textbook writers usually get wrong: II. Heat and energy. *Physics Teacher*, 30, 353-356.
<https://doi.org/10.1119/1.2343574>
- Besson, U. (2001). Work and Energy in the Presence of Friction: The Need for a Mesoscopic Analysis. *European Journal of Physics*, 22, 613-622.
<https://doi.org/10.1088/0143-0807/22/6/306>
- Besson, U., Borghi, L., De Ambrosis, A. y Mascheretti, P. (2007). How to teach friction: Experiments and models. *American Journal of Physics*, 75(12), 1106-1113.
<https://doi.org/10.1119/1.2779881>
- Beynon, J. (1990). Some myths surrounding energy. *Physics Education*, 25(6), 314-316.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/25/6/305>
- Boohan, R. y Ogborn, J. (1996). *Energy and change: Introducing a new approach*. Londres: Institute of Education, University of London. <https://scholar.google.es>
- Bowden, J., Dall'Alba, G., Martin, E., Laurillard, D., Marton, F., Master, G. y Walsh, E. (1992). Displacement, velocity, and frames of reference: Phenomenographic studies of students' understanding and some implications for teaching and assessment. *American Journal of Physics*, 60, 262.
<https://doi.org/10.1119/1.16907>
- 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.
<https://doi.org/10.1119/1.5109519>
- Chrisolm, D. (1992). Some energetic thoughts. *Physics Education*, 27, 215-220.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/27/4/009>
- Cortazzi, M. (1993). *Narrative Analysis*. Brighton: Falmer Press.
<https://doi.org/10.4324/9781315067421>
- Dawson-Tunik, T. L. y Stein, Z. (2008). It has bounciness inside! En *Developing conceptions of energy*. <https://scholar.google.es>
- Ding, L., Chabay, R. y Sherwood, B. (2013). How do students in an innovative principle based on mechanics course understand energy concepts? *Journal of Research in Science Teaching*, 50(6), 722-747.
<https://doi.org/10.1002/tea.21097>
- Doménech, 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.
<https://doi.org/10.1007/s11191-005-5036-3>
- Doménech, J. L., Limiñana, R. y Menargues Marcilla, M. A. (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*, 31(3), 103-119. <https://scholar.google.es>

- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11, 481-490. <https://scholar.google.es>
- Driver, R. y Warrington, L. (1985). Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physics Education*, 20(4), 171-176. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/4/308>
- Duit, R. (1981). Understanding Energy as Conserved Quantity-Remarks on the Article by R. U. Sexl. *European Journal of Science Education*, 3(3), 291-301. <https://doi.org/10.1080/0140528810030306>
- Duit, R. (1986). In search of an energy concept. En R. Driver y R. Millar (Eds.), *Energy matters* (pp. 67-101). Leeds: University of Leeds. <https://scholar.google.es>
- Duit, R., Treagust, D. y Mansfield, H. (1996). Investigating students understanding as prerequisite to improve teaching and learning in science and mathematics. En D. Treagust, R. Duit y B. J. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics* (pp. 17-31). Nueva York: Teachers Press College. <https://scholar.google.es>
- Ebenezer, J. y Fraser, D. (2001). First year chemical engineering students' conceptions of energy in solution processes: Phenomenographic categories for common knowledge construction. *Science Education*, 85, 509. <https://doi.org/10.1002/sce.1021>
- Engel Clough, E. y Driver, R. (1986). A study of consistency in the use of students' conceptual framework across different task contexts. *Science Education*, 70(4), 473-496. <https://doi.org/10.1002/sce.3730700412>
- Erlichson, H. (1977). Work and kinetic energy for an automobile coming to a stop. *American Journal of Physics*, 45(8), 769-769. <https://doi.org/10.1119/1.10770>
- Fishbane, P. M., Gasiorowicz, S. y Thornton, S. T. (1994). *Física: para ciencias e ingeniería*. Hispanoamericana: Prentice Hall.
- Gailunas, P. (1988). Is energy a thing? Some misleading aspects of scientific language. *School Science Review*, 69, 587-590. <https://scholar.google.es>
- Guisasola, J., Almudi, J. M. y Zuza, K. (2013). University students' understanding of electromagnetic induction. *International Journal of Science Education*, 35(16), 2692-2717. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.624134>
- Gutiérrez-Berraondo, J., Zuza, K., Zavala, G. y Guisasola, J. (2018). Ideas de los estudiantes universitarios sobre las relaciones trabajo y energía en Mecánica en cursos introductorios de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 40(1). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0131>
- Hicks, N. (1983). Energy is the capacity to do work - or is it? *Physics Teacher*, 21, 529-530. <https://doi.org/10.1119/1.2341393>
- Jewett, J. W. (2008a). Energy and the Confused Student II: Systems. *The Physics Teacher*, 46(4), 81-86. <https://doi.org/10.1119/1.2834527>
- Jewett, J. W. (2008b). Energy and the Confused Student III: Language. *The Physics Teacher*, 46(4), 149-153. <https://doi.org/10.1119/1.2840978>
- Jewett, J. W. (2008c). Energy and the Confused Student IV: A Global Approach to Energy. *The Physics Teacher*, 46(4), 210-217. <https://doi.org/10.1119/1.2895670>

- Jewett, J. W. (2008d). Energy and the Confused Students I: Work. *The Physics Teacher*, 46(4), 38-43.
<https://doi.org/10.1119/1.2823999>
- Larkin, J. H. y Rainard, B. (1984). A research methodology for studying how people think. *Journal of Research in Science Teaching*, 21(3), 235-254.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660210302>
- Leach, J. y Scott, P. H. (2008). Teaching for the conceptual understanding: An approach drawing on individual and sociocultural perspective. En S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*. (pp. 647-675). Nueva York / Londres: Routledge. <https://scholar.google.es>
- Lindsey, B. A., Heron, P. R. y Shaffer, P. S. (2009). Student ability to apply the concepts of work and energy to extend systems. *American Journal of Physics*, 77(11), 999-1009.
<https://doi.org/10.1119/1.3183889>
- Lindsey, B. A., Heron, P. R. y Shaffer, P. S. (2012). Student understanding of energy: Difficulties related to systems. *American Journal of Physics*, 80(2), 154-163.
<https://doi.org/10.1119/1.3660661>
- Lithner, J. (2008). A research framework for creative and imitative reasoning. *Educational Studies in Mathematics*, 67, 255-276.
<https://doi.org/10.1007/s10649-007-9104-2>
- Mallinckrodt, A. J. y Leff, H. S. (1992). All about work. *American Journal of Physics*, 60(4), 356-365.
<https://doi.org/10.1119/1.16878>
- Marton, F. (1981). Phenomenography-Describing conceptions of the world around us. *Instructional Science*, 10, 177-200.
<https://doi.org/10.1007/bf00132516>
- Marton, F. y Booth, S. (1997). *Learning and awareness*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers. <https://scholar.google.es>
- Mestre, J. P., Thaden-Koch, T. C., Dufresne, J. y Grace, W. J. (2004). The dependence of knowledge deployment on context among Physics novices. En *Research on Physics Education, Proceedings of the international School of Physics «Enrico Fermi»*. Ámsterdam: IOS Press. <https://scholar.google.es>
- Mungan, C. E. (2005). A classic chase problem solved from a physics perspective. *European Journal of Physics*, 26(6), 985.
<https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/6/005>
- Ogborn, J., Kress, G. y Martins, I. (1996). *Explaining science in the classroom*. McGraw-Hill Education. <https://scholar.google.es>
- Papadouris, N., Constantinou, C. P. y Kyratsi, T. (2008). Students' use of the energy model to account for changes in physical systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(4), 444-469.
<https://doi.org/10.1002/tea.20235>
- Penchina, C. M. (1978). Pseudowork-energy principle. *American Journal of Physics*, 46(3), 295-296.
<https://doi.org/10.1119/1.11359>
- Prain, V. y Hand, B. (1999). Students perceptions of writing for learning in secondary school science. *Science Education*, 83(2), 151-162.
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-237x\(199903\)83:2<151::aid-sce4>3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-237x(199903)83:2<151::aid-sce4>3.0.co;2-s)
- Rivard, L. P. (1994). A review of writing to learn in science: Implications for practice and research. *Journal of Research in Science Teaching*, 31, 969-983.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660310910>
- Romer, R. H. (2001). Heat is not noun. *American Journal of Physics*, 69, 107-109.
<https://doi.org/10.1119/1.1341254>

- Scott, P., Asoko, H. y Leach, J. (2008). Student conceptions and conceptual learning science. En A. K. Abell y N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education*. Nueva York: Routledge. <https://scholar.google.es>
- Sextl, R. U. (1981). Some observations concerning the teaching of the energy concept. *European Journal of Science Education*, 3, 285-289. <https://doi.org/10.1080/0140528810030305>
- Sherwood, B. A. (1983). Pseudowork and real work. *Journal of Physics*, 51(7), 597-602. <https://doi.org/10.1119/1.13173>
- Sherwood, B. A. y Bernard, W. H. (1984). Work and heat transfer in the presence of sliding friction. *American Journal of Physics*, 52(11), 1001-1007. <https://doi.org/10.1119/1.13775>
- Taber, K. S. (2006). Constructivism's new clothes: The trivial, the contingent and a progressive research programme into learning of science. *Foundations of Chemistry*, 8, 189-219. <https://doi.org/10.1007/s10698-005-4536-1>
- Tahirsylaj, A., Niebert, K. y Duschl, R. (2016). Curriculum and didaktik in 21st century: Still divergent or converging? *European Journal of Curriculum Studies*, 2(2), 262-281. <https://scholar.google.es>
- Tarsitani, C. y Vicentini, M. (1991). *Calore, energia, entropia*. Milán: Ed. Franco Angeli.
- Tipler, P. A. y Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología*. Reverte. <https://scholar.google.es>
- Trumper, R. (1990). Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept part one. *International Journal of Science Education*, 12, 343-354. <https://doi.org/10.1080/0950069900120402>
- Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15, 139-148. <https://doi.org/10.1080/0950069930150203>
- Viennot, L. (2001). *Reasoning in Physics: The part of common sense*. Springer Science / Business media. <https://doi.org/10.5860/choice.39-4641>
- Vosniadou, S. (2012). Reframing the Classical Approach to Conceptual Change Preconceptions, Misconceptions and Synthetic Models. En B. J. Fraser, K. G. Tobin y C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education vol. I*. Londres: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_10
- Vygotsky, L. S. (1978). Interaction between learning and development. En M. Gauvain y M. Cole (Eds.), *Readings on the development of children*. Nueva York: W. H. Freeman and Company. <https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4.11>
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. y Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in Science. En D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of Research on Science teaching and Learning*. Nueva York: McMillan Publications. <https://scholar.google.es>
- Warren, J. W. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4(3), 295-297. <https://scholar.google.es>
- Watts, M., Gould, G. y Alsop, S. (1997). Questions of understanding: Categorising pupils' questions in Science. *School Science Review*, 79, 57. <https://doi.org/10.1080/0950069970190903>
- Zuza, K., Van Kampen, P., De Cock, M., Kelly, T. y Guisasola, J. (2018). Introductory university physics students' of some key characteristics of classical theory of the electromagnetic field. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 020117. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.14.020117>
- Young, H. D. y Feedman, R. A. (2009). *Sears-Zemansky Física Universitaria*. México DF: Addison-Wesley. <https://scholar.google.es>

ANEXO. CUESTIONES

Cuestión C1

Un estudiante ha llegado a la siguiente conclusión: «Si sobre un sistema se realiza un trabajo, la energía cinética del sistema aumenta». ¿Estás de acuerdo con el estudiante? Justifica tu respuesta.

Cuestión C2

En el instante t_1 el coche se mueve con velocidad v_1 . Después de pasar un tiempo, en el instante t_2 , la velocidad del coche es 0. Aplica el principio general de la energía, que viene representado por la ecuación $E_{\text{inicial}} + W_{\text{externo}} = E_{\text{final}} + \Delta U_{\text{int}}$, y comenta los cambios de energía que han tenido lugar.

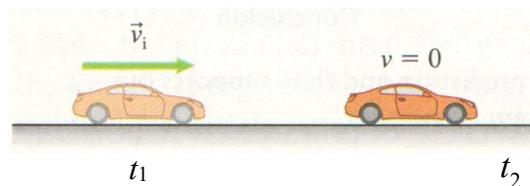


Figura 1

Cuestión C3

Una masa de 100 gramos está conectada a un muelle de constante elástica 5 N/m (ver figura 2(i)). Se desplaza 0,70 metros de la posición de equilibrio hacia la derecha (ver figura 2(ii)). Se suelta la masa desde esa posición de desplazamiento de 0,70 m cuando está en reposo (ver figura 2(iii)). Al deslizar la masa sobre el suelo no hay rozamiento.

Calcula la energía del sistema cuando la masa llega a 0,40 metros de la posición de equilibrio (ver figura iii), si:

- el sistema está formado por la masa de 100 g,
- el sistema está formado por la masa y el muelle.

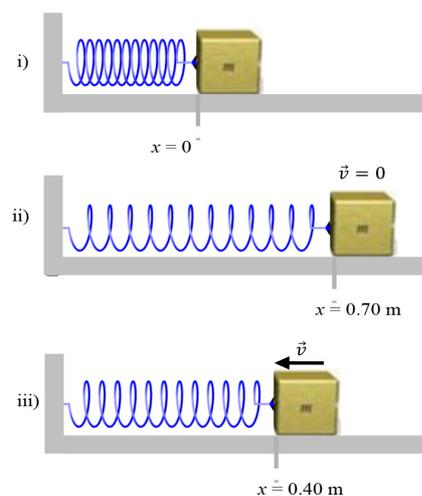


Figura 2

Understanding and epistemic deficiencies of university students in the construction of explanatory categories on work-energy relationships

José Gutiérrez-Berraondo
Escuela Universitaria de Ingeniería Dual-IMH, Elgoibar, Gipuzkoa, España,

jpguerr@imh.eus

Kristina Zuza
Universidad del País Vasco, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, San Sebastián, Gipuzkoa, España.

kristina.zuza@ehu.eus

Genaro Zavala
Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Monterrey, México.

genaro.zavala@tec.mx.

Jenaro Guisasola
Universidad del País Vasco, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, San Sebastián, Gipuzkoa, España.

jenaro.guisasola@ehu.eus

The understanding of the generalized principle of work and energy is crucial to apply the relationships of work and energy in general physics courses and in the decision-making of citizens in problems related to the consumption and transfer of energy and machines. However, some studies indicate that students have difficulties in understanding the concepts of mechanical work and energy. These studies have been carried out more often at the pre-university level, so it is considered necessary to analyze the understanding of university students on these concepts to improve knowledge on the teaching of this topic at introductory physics courses. This study adds to the previous research on the difficulties of students in understanding the concepts of work and energy, the topic of understanding the relationships between work and energy through the generalized principle of work and energy at university level. The research methodology used shares the assumptions of the social-constructivist theory of learning, understood as «building knowledge» and identifies the forms of written and oral expression as instruments of measurement between the social and personal spheres. A questionnaire with open questions has been designed to detect students' learning difficulties in the concepts involved. The sample consists of 148 students of first year of Engineering for the subject of Physics at the University of the Basque Country (UPV/EHU) formed by 87 % of men and 13 % of women between the ages of 18 and 20. The analysis of the responses has been carried out using the phenomenographic methodology, which focuses on establishing interpretative categories at the collective level. The results show that students do not understand the concept of work and energy and do not recognize the need for modelling analysis using a system. Thus, it is suggested that the teaching of the subject should emphasize the choice of the system where the generalized principle of work and energy is applied and that this is fulfilled in any system chosen for the same situation or phenomenon. It has also been observed that it would be desirable to present the kinetic energy theorem, the conservation of kinetic and potential energy, and the conservation of mechanical energy as relationships derived from the generalized principle of work and energy, so that students can analyze the coherence of the principle for different situations of Newtonian mechanics. Finally, we emphasize that some errors are more frequent in situations involving friction forces. The difficulties appear both at the conceptual and epistemological levels. The results that we have found, for first-year university students, indicate that the difficulties are not limited to the level of secondary education. Finally, it is considered necessary to take account of these difficulties in research-based proposals aimed at improving learning.

