

# QUÉ ENTIENDEN LOS ESTUDIANTES EN CURSOS INTRODUCTORIOS DE FÍSICA SOBRE EL PRINCIPIO GENERALIZADO DE TRABAJO Y ENERGÍA: UN ESTUDIO EN DOS PAÍSES

José Gutierrez-Berraondo

*Escuela Ingeniería en alternancia IMH- Elgoibar*

Ander Goikoetxea, Jenaro Guisasola

*Universidad del País Vasco*

Genaro Zavala

*Tecnológico de Monterrey, Mexico*

**RESUMEN:** Las relaciones entre trabajo y energía siguen siendo una fuente de problemas de enseñanza-aprendizaje en los primeros años de universidad para Física General, ya que se trata de comprender conceptos abstractos y utilizar habilidades propias de la metodología científica. Considerando los estudios previos en la literatura, el principal objetivo de este artículo es identificar y documentar las dificultades concretas que los estudiantes tienen mientras piensan y razonan sobre la relación entre trabajo y energía para sistemas mecánicos. Esta investigación consiste en el análisis de las respuestas a un cuestionario sobre trabajo-energía para estudiantes de cursos introductorios de física en la Universidad del País Vasco (España) y en el Tecnológico de Monterrey (México). En el artículo se presentan los resultados de dos de las cuestiones planteadas a los estudiantes y las conclusiones generales.

**PALABRAS CLAVE:** Investigación en Enseñanza de la Física, Primer principio del trabajo y la energía, dificultades de aprendizaje de los estudiantes

**OBJETIVOS:** En este trabajo, analizamos las dificultades que encuentran los estudiantes universitarios en la comprensión del Principio General del Trabajo y la Energía (en adelante, PGTE) en situaciones de mecánica clásica. En relación a la investigación previa sobre dificultades de comprensión del PGTE este trabajo añade que los estudiantes universitarios hacen una inadecuada generalización del principio y, dado que se ha realizado en dos países (España y México), una posible tendencia internacional de estos resultados.. Además, se ha centrado en las relaciones entre dos conceptos diferentes epistemológicamente pero que se complementan: Trabajo y Energía.

## MARCO TEÓRICO

Este trabajo se sitúa dentro del paradigma constructivista del aprendizaje y, en particular en la línea de investigación en Concepciones Alternativas. La comprensión de las concepciones de los estudiantes, es un aspecto importante de la enseñanza. La identificación de los conceptos y teorías que los estudiantes aprenden bien, y aquellos con los que tienen dificultades, puede guiar la enseñanza y el desarrollo curricular. El aprendizaje en cursos introductorios de Física en el bachillerato y en la universidad, requiere que los estudiantes utilicen ideas sofisticadas con las que no están familiarizados y, no es sorprendente que diferentes estudios muestren que algunas de las dificultades de comprensión de los estudiantes sean debidas a la enseñanza recibida (Viennot, 2001).

Este trabajo comienza recogiendo los resultados de la investigación previa en Concepciones Alternativas. El gran número de investigaciones publicadas sobre el tema muestran que los conceptos de trabajo y energía y sus relaciones son particularmente complejos y que hay interés y preocupación en el profesorado y entre investigadores (Bächold and Guedj, 2014). La mayoría de los estudios se han llevado a cabo en niveles preuniversitarios (Trumper, 1993; Domenech et al., 2007) y algunos de ellos han sido a nivel universitario (Lindsey, Heron and Shaffer 2012). Este trabajo se ha desarrollado en cursos introductorios de física a nivel universitario para estudiantes de ciencias y de ingeniería en dos países diferentes.

La introducción del concepto de trabajo en los libros de texto lleva a una discusión sobre la fuerza  $\mathbf{F}$  aplicada a un objeto que se mueve a través de un desplazamiento  $\Delta\mathbf{r}$ . Esto es seguido por la presentación de la ecuación:  $W = \mathbf{F} \times \Delta\mathbf{r} = F\Delta r \cos\theta$ . Sin embargo, muchos libros de texto utilizan expresiones generales como: “ $\Delta\mathbf{r}$  es el desplazamiento del objeto” o simplemente “el desplazamiento” sin identificar qué es lo que se desplaza. En relación con el término “fuerza”, a menudo ocurre que hay varias fuerzas que actúan sobre el sistema. La fuerza en esos casos, no es cualquier tipo de fuerza, es la fuerza neta, de modo que es necesario discutir cómo calcular el trabajo neto de todas las fuerzas. A menudo, el profesorado y los libros de texto se centran en examinar los efectos de las fuerzas en relación con el cambio de energía para situaciones sencillas en las que sólo hay cambio de la energía cinética. Sin embargo, para situaciones más complejas, es mejor pensar en sistemas más que en objetos (Lindsey, Heron and Shaffer, 2012). Además, la relación entre trabajo y energía implica más tipos de energía, no sólo la energía cinética (Bächold and Guedj, 2014). No definir el sistema y los distintos tipos de energía podría conducir a dificultades conceptuales cuando los estudiantes aplican la relación entre trabajo y energía en diferentes contextos. Esto podría ser un problema en el estudio de sistemas mecánicos en los que el alumno encuentre trabajo realizado por fuerzas de fricción o por fuerzas aplicadas a objetos deformables (muelles) (Mallinckrodt and Leff, 1992).

Teniendo en cuenta los estudios previos, este trabajo muestra evidencias empíricas acerca de la comprensión del principio trabajo-energía por parte de los estudiantes universitarios de Física General. Estudios previos de investigación entre países diferentes sugieren que, a pesar de que puede haber variaciones de individuo a individuo, existen patrones comunes en las dificultades conceptuales que aparecen en el grupo de estudiantes como un todo, sin importar lo diferentes que sean sus sistemas educativos y culturales (Saglam and Millar, 2006). Así pues, nuestros resultados pueden ser aprovechados por profesores, autores de libros de texto y diseñadores curriculares a nivel internacional, a la hora de planificar las actividades para el capítulo del Principio Generalizado del Trabajo y Energía en mecánica.

La investigación que se presenta aquí es parte de un estudio sobre la enseñanza y el aprendizaje del principio generalizado de trabajo y energía en cursos introductorios de física en la universidad. Este trabajo informa de la comprensión de los estudiantes en la relación entre trabajo y energía en contextos de mecánica clásica. Vamos a describir dos de las preguntas del cuestionario que se ha preparado sobre la comprensión del PGTE.

## METODOLOGÍA

Para investigar sobre la comprensión de los estudiantes en el PGTE, se diseñó un cuestionario con cuatro preguntas abiertas centradas en la explicación. Para la *validación del cuestionario* se realizó un estudio piloto con 30 estudiantes de primer curso. Este estudio piloto confirmó que los estudiantes no tuvieron ningún problema para entender cómo se formularon las preguntas. Además, el objetivo de cada pregunta fue validado por tres profesores del primer curso de ingeniería que estaban plenamente de acuerdo con el contenido. Como resultado de los dos instrumentos se introdujeron algunas modificaciones en la redacción de las preguntas y se realizó la versión final del cuestionario que se pasó a los estudiantes.

El análisis de las respuestas fue realizado utilizando la metodología cualitativa denominada fenomenografía (Marton and Booth, 1997). Seguimos la teoría de la Fenomenografía, que muestra cómo diferentes formas de percibir y comprender la realidad (es decir, los conceptos y el razonamiento) pueden ser convertidos en únicas categorías descriptivas. Estas categorías pueden ser observadas entre un gran número de individuos. Como Marton y Booth (1997) indican “en la fenomenografía, los individuos son vistos como transmisores de diferentes formas de experimentar un fenómeno y como transmisores de fragmentos de diferentes maneras de experimentar este fenómeno” (p. 114). Las descripciones de los estudiantes se agrupan y, en ese sentido, las aportaciones individuales no son el centro de atención. Esta metodología se utiliza comúnmente en los estudios que buscan cualitativamente diferentes formas en que los individuos conciben los fenómenos en física. Nuestra población consta de dos grupos de alumnos de dos países diferentes. La fenomenografía, estadísticamente no nos dirá las medidas de comparación de los dos grupos. La Fenomenografía nos dice si las poblaciones comparten las mismas maneras de conceptualizar (categorías) los sujetos estudiados. Así pues, no es nuestra prioridad ver si las respuestas eran o no correctas. Para la definición de las categorías hemos seguido un riguroso análisis fenomenográfico. Según Marton y Booth, la creación de categorías debe seguir un conjunto específico de criterios: a) Cada categoría debe estar claramente relacionado con fenómenos de investigación, de manera que cada uno revela algo diferente acerca de una determinada manera de experimentar el fenómeno; b) las categorías deben ser jerárquicas, o en otras palabras, se debe avanzar, desde relaciones simples a relaciones complejas; c) el sistema de clasificación debe tener un número de categorías lo más bajo posible.

En relación a *la fiabilidad del análisis*, se siguieron las recomendaciones de Cohen, Manion and Morrison (2007) para análisis cualitativos. Un miembro del equipo de investigación leyó las respuestas de los alumnos y extrajo un borrador de un conjunto de categorías descriptivas para cada cuestión. El mismo investigador volvió a leer las respuestas de los alumnos y provisionalmente asignó cada una de las respuestas en alguna de las categorías establecidas. Los otros investigadores llevaron a cabo la misma tarea de manera independiente. Una vez que las respuestas fueron clasificadas se compararon las clasificaciones realizadas en las diferentes categorías. Cualquier desacuerdo sobre la descripción de la categoría o de asignación de respuesta se discutió. Después de definir las categorías finales, se alcanzó un grado muy alto de acuerdo del 95% de concordancia entre los pares de los investigadores, con un coeficiente de fiabilidad Cohen kappa media de 0,84. Un proceso iterativo produjo la última descripción de categorías.

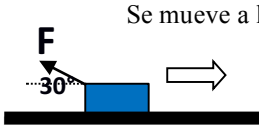
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Recolección de datos y cuestionario

Se pasó el cuestionario a estudiantes de primer curso del grado de Ingeniería de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) (N=144) y de la Escuela de Ingeniería del Tecnológico de Monterrey (ITESM) (N=131). En el caso de la Universidad del País Vasco, las preguntas fueron incluidas en los exámenes de primer curso como parte del sistema de evaluación. En el Tecnológico de Monterrey, las preguntas fueron incluidas en un cuestionario para el diagnóstico. Los estudiantes de ambos países llegan a primer curso de Universidad con un background similar en física, ya que han cursado dos años de Física en la Secundaria Post-Obligatoria. La metodología de enseñanza en ambas universidades es similar con clases magistrales que explican la teoría de forma transmisiva y clases de problemas donde el profesor explica la resolución de los problemas. En ambas universidades el programa es similar y utilizan libros de texto norteamericanos como, por ejemplo, “Física para la Ciencia y la Tecnología” de Tipler y Mosca (2005).

Para evaluar la comprensión de las relaciones cuantitativas entre trabajo y energía diseñamos cuatro preguntas. Las dos primeras preguntas trataron de la definición del trabajo y de los conceptos que intervienen en esta definición. Estas preguntas requerían reconocer las fuerzas involucradas en el problema, así como su trayectoria. Así mismo, se pregunta a los estudiantes sobre la relación entre el trabajo realizado y la variación de energía del sistema. Una de las cuestiones se presenta en la figura 1.

Cuestión C2.- Una caja se desplaza 2 metros actuando sobre ella una sola fuerza  $F$  de 3 N y sin fricción con la superficie. Las direcciones del movimiento y de la fuerza se indican en la figura:



Se mueve a la derecha

a) Calcula el trabajo hecho por la fuerza  $F$  sobre la caja al recorrer los 2 metros. Justifica tu respuesta.

b) ¿Varía la energía de la caja al recorrer los 2 metros? Si es que sí, calcula la variación de energía y justifica tu respuesta. Si no varía, justifica tu respuesta

Fig. 1. Cuestión C2 que se presenta al estudiante en el estudio. Para contestar esta pregunta, el estudiante debe tener clara la definición del trabajo pues la fuerza, además de no ir en dirección del desplazamiento, hace un ángulo diferente a cero o 180 grados con éste.

Las otras dos preguntas tienen como objetivo aplicar el principio generalizado de trabajo-energía. Las preguntas son familiares para los estudiantes en el contexto académico. Por ejemplo, la pregunta C4 se muestra en la figura 2.

Cuestión C4.- El Teorema de la Energía Cinética se suele expresar mediante la ecuación  $\Delta K = W_{\text{externo}}$ . ¿Es válida esta ecuación para cualquier tipo de transformaciones que se analicen? Justifica tu respuesta con un ejemplo.

Fig. 2. La cuestión 4 indaga sobre el entendimiento de la aplicación del teorema de la energía cinética. Se pide un ejemplo pues éste puede revelar el pensamiento del estudiante con una situación concreta.

De acuerdo con la literatura, los estudiantes podrían responder que la ecuación es válida independientemente de la situación, pero queríamos saber, en qué medida esta concepción existe y si hay otras concepciones diferentes en estos dos países.

## Resultados

En esta sección mostraremos los resultados obtenidos en ambos grupos de estudiantes para las dos preguntas descritas anteriormente. En la discusión identificaremos algunas dificultades conceptuales que parecen ser comunes en muchos estudiantes. Los resultados de las respuestas de los estudiantes a la Pregunta C2 se muestran en porcentajes en la tabla I.

Tabla I  
*Resultados de la cuestión C2 en ambas universidades*

Categoría	UPV/EHU (N=144)	ITESM (N=131)
A - Calcula el trabajo correctamente:	29,0%	27,5%
A.1. Lo relaciona con la variación de la energía correctamente	19%	20,0%
A.2. No relaciona el trabajo y la energía	10,0%	7,5%
B- Tiene dificultades al calcular el producto escalar del trabajo y afirmaciones genéricas sobre que la energía varía.	30,5%	24,0%
C. Elementos aislados del marco teórico que no contestan a la pregunta	8,0%	20,5%
Incoherente.	17,0%	11,0%
No contesta	15,5%	17,0%

La categoría A incluye explicaciones en las que el trabajo se calcula correctamente como el producto escalar de los vectores fuerza y desplazamiento. Dentro de estas respuestas, la mayoría relaciona correctamente el trabajo y energía (categoría A.1), aunque hay una fracción de respuestas que no menciona la relación (categoría A.2). Sin embargo, la mayoría de las respuestas no calcula correctamente el trabajo porque no calcula correctamente el producto escalar (categoría B) o porque aplican recuerdos memorísticos mal asimilados (Incoherentes). Por ejemplo, algunas de las respuestas de la categoría B no tienen en cuenta el producto escalar en la definición de trabajo: “El trabajo realizado por la fuerza es:  $W = F d$ , y “d” es la distancia que el bloque recorre”. Este tipo de respuesta reduce la definición de trabajo a un producto aritmético de dos magnitudes, distancia y fuerza. Así mismo, una fracción importante de estudiantes (categoría C), no parece plantear una estrategia adecuada al objetivo de la cuestión, a pesar de que muestran que han entendido lo que se pregunta. Por ejemplo: “El trabajo es la fuerza ejercida durante un espacio de tiempo. Además, cuando la caja está quieta no tiene energía cinética. Gracias a la fuerza realizada, la caja consigue movimiento, por lo tanto, se produce un cambio en la energía cinética”

Los resultados de las respuestas de los estudiantes a la Pregunta C4 se muestran en porcentajes en la tabla II

Tabla II  
*Resultados de la cuestión C4 en ambas universidades*

Categoría	UPV/EHU (N=144)	ITESM (N=131)
A.1. Argumentos basados en el principio general de Trabajo y Energía	3.0%	2.5%
A.2. Argumentos generales en contra de la generalización del Teorema	26.5%	26.0%
B. Argumentos incompletos en contra de la generalización del teorema	5.5%	14.5%
C.1. El teorema de la energía cinética es siempre válido	27.5%	34.5%
C.2. El teorema es solo válido si la fuerza es conservativa	7.0%	1.5%
Incoherente	17.5%	10.0%
No responde	13.0%	11.0%

En la categoría A, se incluyen las respuestas correctas. Estas respuestas utilizaron dos argumentos diferentes: a) analiza el sistema utilizando el Principio General:  $E_i + W_{\text{ext}} = E_f$  (categoría A.1); b) hay más tipos de energía que afectan en la relación de trabajo y energía y por lo tanto, el teorema no es válido (categoría A.2). Por ejemplo: “No es válida en general. La energía mecánica es la suma de la energía cinética y energía potencial  $E_m = E_C + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 + m \cdot g \cdot h$ . Además hay que añadir la variación de la energía interna del sistema. La energía cinética es la energía que tiene un cuerpo con velocidad. La energía potencial es la energía que tiene un cuerpo por estar a una altura” (categoría A.2.)

La categoría B implica respuestas donde los estudiantes argumentan en un caso particular, como ejemplo en el que el teorema no se cumple. Por ejemplo: “Esta ecuación no es siempre válida. Por ejemplo, un ciclista subiendo una colina al llegar a la cima la velocidad será 0 y la energía cinética se habrá transformado en energía potencial”. Los estudiantes en esta categoría saben que el teorema no es válido, pero falta comprender por qué no es válido. Normalmente sus ejemplos, aunque la mayoría de ellos aplicables, tenían concepciones que se sitúan fuera de las concepciones científicas o del fenómeno explicado.

## CONCLUSIONES

Hay dos principales conclusiones de este estudio. Después de la instrucción, una minoría de estudiantes aplica correctamente la definición de trabajo como producto escalar de dos magnitudes vectoriales y, sólo una pequeña fracción de los estudiantes han desarrollado un marco coherente del uso de las relaciones de trabajo y energía. Así mismo, un porcentaje importante de alumnos creen que el teorema de la energía cinética es válido en cualquier situación sin tomar en cuenta los diferentes tipos de energía que podrían estar implicados o el sistema elegido. La segunda conclusión es que, aunque se trata de un estudio de dos instituciones para dos países diferentes que tienen una cultura diferente, las respuestas de los alumnos muestran tendencias comunes de categorías explicativas. Esto puede implicar una generalización de las dificultades de aprendizaje del PGTE en el contexto internacional.

Estos resultados tienen claras implicaciones para investigadores en Enseñanza de la Física, autores de libros de texto y profesorado de física. El profesorado debe tener en cuenta que los estudiantes necesitan un marco coherente sobre las relaciones entre trabajo y energía y, diseñar estrategias educativas basadas en la investigación. En futuros trabajos se tratará de realizar un diseño de secuencias de enseñanza que destaque los límites de este teorema de la energía cinética, la importancia de la definición del sistema como instrumento de análisis y las diferentes energías que podrían transformarse en trabajo.

## REFERENCIAS

- BÄCHTOLD, M. and GUEDJ, M. (2014). Teaching energy informed by the History and Epistemology of the concept with implications for teacher education *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, Chapter 8, 211-243. In M.R. Matthews(ed.). Springer, Dordrecht.
- COHEN, L., MANION, L., and MORRISON, K. (2007). *Research Methods in education*. 6<sup>th</sup> edition. London: Routledge, 51-77.
- DOMENECH, J.L., GIL-PÉREZ, D., GRAS-MARTÍ, A., GUIASOLA J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., TRUMPER R., VALDÉS P, and VILCHES A. (2007). Teaching of Energy Issues: A Debate Proposal for a Global Reorientation. *Science & Education*, 16, 43-64.
- LINDSEY, B. A., HERON, P.R. L., and SHAFFER, P. S. (2012). Student understanding of energy: Difficulties related to systems. *American Journal of Physics*, 80(2), 154-163.
- MALLINCKRODT, A. J., and LEFF, H.S. (1992). All about work. *American Journal of Physics*, 60, 356-365.
- MARTON, F., and BOOTH, S. (1997). *Learning and Awareness* . Lawrence Erlbaum Mahwah. New Jersey.
- SAGLAM, M., and MILLAR, R. (2006). Upper high school students' understanding of electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 28(5), 543-566.
- TRUMPER, R. (1993). Childrens' energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15(2), 139-148.
- VIENNOT, L. (2001). *Reasoning in Physics. The part of common sense*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic.

