

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIV JORNADAS

VOLUMEN 10 (2004), Nº10

Pío García
Patricia Morey
Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



El problema de la categoría ontológica del concepto de energía

Olimpia Lombardi / Martín G. Labarca†*

1. Introducción

El concepto de energía cumple un papel central no sólo en la física contemporánea y en las demás ciencias fácticas, sino también en cada aspecto de la vida humana. Prácticamente no existen formas de la actividad humana que no sean evaluadas en términos de la trilogía: (i) entrada, (ii) transferencia o transformación y (iii) salida de energía. Si, como afirma Lindsay (1975), el concepto de energía expresa probablemente la mayor idea unificadora de la ciencia moderna, cabe preguntarse: ¿poseemos una definición adecuada de tal concepto?

El status ontológico de la energía ha sido objeto de un amplio debate entre físicos y filósofos, al menos desde la Modernidad y con particular énfasis desde mediados del siglo XIX. El núcleo de las discusiones ha sido la confrontación de dos posiciones antagónicas: energía como sustancia y energía como propiedad. En el presente trabajo se analizará la categoría ontológica que puede adjudicarse al concepto de energía en las distintas teorías científicas que conservan su validez en la actualidad. En particular, se argumentará que, en el ámbito cuántico, el concepto de energía ya no puede ser interpretado mediante las categorías de sustancia o propiedad válidas en la física clásica.

2. El advenimiento del concepto moderno de energía

El término 'energía', tal como se lo entiende actualmente, se desarrolló plenamente a partir de la Edad Moderna (siglo XVII). La concepción actual es una generalización de la noción de trabajo en mecánica: la energía suele definirse como la capacidad de efectuar trabajo. Esta idea tuvo su origen en el principio de los desplazamientos virtuales (o velocidades virtuales) el cual, a su vez, tuvo sus raíces en la dinámica aristotélica.

Por otra parte, la medida y conservación de la "fuerza" (entendida entonces como energía) fue objeto de debate intelectual entre cartesianos y leibnizianos a fines del siglo XVII: los primeros sostenían la conservación del momento (es decir, el producto entre la masa y la velocidad), mientras que los últimos afirmaban que la magnitud conservada era la denominada '*vis viva*' ("fuerza viva", esto es, el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad).

Algunos autores afirman que el término 'energía' debe su aparición a Johann Bernoulli, quien en 1717 lo utilizó (definiéndolo como fuerza por velocidad virtual) en una carta enviada a Pierre Varignon de la Academia de Ciencias de París. La posterior difusión del concepto (como un término técnico en su sentido moderno) se debió a los esfuerzos de Young, Rankine y Thomson (Lord Kelvin) recién a comienzos del siglo XIX (Jammer, 1963, 1967). Otros autores indican que

* CONICET Universidad Nacional de Quilmes

† Universidad Nacional de Quilmes, Universidad Nacional de San Martín

Epistemología e Historia de la Ciencia, Volumen 10 (2004), N° 10

Young propuso en 1807 denominar 'energía' a lo que hasta ese momento se denominaba '*vis viva*' (Torretti y Mosterín, 2002).

Por otra parte, la idea del calor concebido como fluido material o como movimiento de las partículas que constituyen los cuerpos fue ampliamente debatida entre mediados del siglo XVIII y principios del siglo XIX. La noción de un fluido imponderable (el '*calórico*', término asignado por Lavoisier a fines del siglo XVIII), que otorgaba entidad física al calor, jugó un importante papel tanto en la fundamentación física de los tres estados de la materia como en la revolución química producida a partir de Lavoisier. Las primeras críticas a la teoría del calórico tuvieron lugar a partir de los célebres experimentos de Benjamín Thompson, Conde Rumford, en 1796 y 1798 en Munich, y de Humphry Davy en 1799, relacionados con el calor producido por fricción. Estos autores arribaron a la conclusión de que el calor es una forma peculiar de movimiento de las partículas componentes de los cuerpos. Casi 40 años después, dichos trabajos fueron retomados y confirmados por von Mayer y Joule. Sobre la base de esta nueva concepción comenzó a pensarse en la posible unificación de los procesos mecánicos, luminosos, eléctricos, químicos y termodinámicos, procesos considerados inconmensurables en tiempos anteriores. Tal unificación de los fenómenos naturales se llevó a cabo mediante el *principio de conservación de la energía* debido a los esfuerzos de von Mayer, Joule, Helmholtz y Colding quienes lo enunciaron, de manera independiente, a mediados del siglo XIX.

Es interesante señalar que, inicialmente, el concepto de energía era tema de debate entre los filósofos más que entre los físicos mecanicistas. Pero desde mediados del siglo XIX y hasta el presente, el status ontológico de la energía ha sido objeto de un amplio debate entre físicos y filósofos. El núcleo de las discusiones ha sido la confrontación de dos posiciones antagónicas: energía como sustancia y energía como propiedad. La concepción de la energía como sustancia fue defendida por Ostwald, Heisenberg, Mach y Duhem, entre los científicos y filósofos de renombre. La concepción de la energía como propiedad fue sostenida por Lindsay, Margenau y Bunge, entre otros autores.

3. El concepto de energía en física clásica

Cuando en mecánica newtoniana se afirma que energía es la capacidad de producir trabajo, se considera implícitamente que se trata de una cierta capacidad que posee un cuerpo material. De un cuerpo elevado a una cierta altura respecto de un plano de referencia y en un campo gravitacional se dice que posee energía potencial. O de un cuerpo que se mueve a una cierta velocidad se dice que posee una cierta energía cinética. En todos los casos se observa que la energía no es una entidad que pueda existir separadamente del cuerpo material que la posee, sino que se encuentra ineludiblemente vinculada a él. Pero dicha vinculación no se concibe como la unión entre dos entidades de la misma categoría ontológica: la energía es una capacidad que posee el objeto, una potencialidad propia de las entidades materiales. En este sentido, el concepto de energía no pertenece a la categoría ontológica de sustancia sino a la de propiedad.

Es con el advenimiento de la ciencia del calor que la cuestión acerca de la categoría ontológica de la energía se hace explícita. La creencia de que el calor era

movimiento de partículas materiales había dominado la ciencia de principios del siglo XVIII al amparo de las ideas de Newton, pero luego fue abandonada en favor de la teoría del calórico, donde la energía calórica se convierte en una sustancia. Cuando, a partir de los trabajos de Thompson y Davy, reaparece la noción del calor como movimiento, el problema consiste en transformar la idea de un "modo de movimiento" en una teoría cuantitativa de mayor alcance, y ello exige un modelo de agregados materiales al que la matemática pueda aplicarse fácilmente. Los modelos de los gases mostraron tener la sencillez requerida, pero sólo desde fines del siglo XVIII. Anteriormente los gases se concebían como especies químicas con entidad propia cuyas partículas llenaban el espacio y, por lo tanto, sólo podían rotar y vibrar *in situ*; los modelos resultantes encerraban, entonces, todas las dificultades propias de los líquidos y los sólidos. La situación pudo cambiar cuando la química de Lavoisier convenció a los científicos de que un gas no era más que un estado físico particular de una sustancia que también podía existir en estado sólido o líquido; cuando se supo que el vapor era agua en estado gaseoso, rápidamente se vio que sus moléculas no podían ocupar sino una fracción ínfima de su volumen y debían encontrarse muy separadas entre sí. De este modo comenzaron a formularse modelos de gases en los cuales las moléculas viajaban en línea recta entre choques sucesivos. En la segunda mitad del siglo XIX, con la teoría cinética de los gases, comenzó a vincularse el calor de un gas con la energía cinética media de los átomos o moléculas que lo componen. Desde esta perspectiva, la energía calórica pasaba a concebirse como un caso particular de energía mecánica y, por tanto, heredaba su categoría ontológica de propiedad.

No obstante, no todos compartían la misma visión de los fenómenos térmicos: el *energetismo*, liderado por Ostwald (1902) y adoptado por autores como Mach y Duhem, cuestionaba insistentemente la realidad del átomo. En su lugar, postulaba la energía como realidad proteica universal. Para estos autores la energía no es ya una propiedad de los objetos materiales que se manifiesta como una capacidad o potencialidad; por el contrario, la energía es concebida como una sustancia elemental de la cual están compuestos todos los objetos, materiales o no. Sin embargo, la vigencia del energetismo fue breve: a principios del siglo XX se consolidó el triunfo del atomismo gracias, principalmente, a los trabajos de Perrin, apoyados por los estudios de Einstein sobre el movimiento browniano. De este modo, la concepción de la energía como sustancia pierde su fuerza y el concepto de energía se afianza en su categoría ontológica de propiedad.

Con el advenimiento del electromagnetismo, la entidad portadora de la energía deja de ser un cuerpo material para pasar a ser una onda. No obstante, en los inicios de la teoría Maxwell y sus contemporáneos intentaban explicar la naturaleza de las ondas electromagnéticas como vibraciones del éter luminífero: en este sentido, la energía continuaba siendo considerada como una propiedad de un medio material. Pero cuando finalmente la idea del éter se abandona como resultado de la imposición de la teoría especial de la relatividad, la entidad portadora de la energía pierde su materialidad: lo que posee o lleva energía ya no es un objeto material sino la propia onda electromagnética. No obstante, ello no modifica la categoría ontológica del concepto de energía, puesto que la energía sigue siendo considerada como un atributo de otra entidad: entre las propiedades que po-

see una onda electromagnética –amplitud, frecuencia, etc.– se encuentra la energía, generalmente relacionada con la amplitud de la onda.

Frente a este panorama, no sorprende que diversos autores contemporáneos conciban la energía desde una perspectiva no-sustancialista, en particular, como un atributo de los objetos físicos ligado a la mutación y a la interacción. Por ejemplo, de acuerdo con Lindsay (1975), la raíz del concepto está anclada en el concepto de *cambio*: a través de todo proceso existe una cualidad *invariante* o “*constante durante el cambio*”, y tal invariante es la energía. Bunge (1977, 1999), por su parte, considera que el concepto de energía debe elucidarse en términos de su relación con el concepto filosófico de *mutabilidad*: la energía representa la *posibilidad de cambio (actual o potencial)* de una cosa concreta. Como hemos señalado, tales elucidaciones, basadas en una concepción de la energía como propiedad, pueden resultar plausibles en el ámbito de la física clásica; de hecho, han sido elaboradas a la luz del papel que juega el concepto de energía en las teorías formuladas previamente a la revolución científica de principios del siglo XX. Sin embargo, cuando entran en juego los fenómenos cuánticos, la concepción de energía como propiedad exige una profunda revisión.

4. El concepto de energía en mecánica cuántica

En 1900 el joven físico alemán Max Planck, analizando los datos de la radiación emitida por sólidos calentados a distintas temperaturas, descubre que los átomos y moléculas emiten energía únicamente en ciertas cantidades discretas definidas y no de manera continua. Planck dio el nombre de ‘*cuanto*’ a la mínima cantidad de energía que podía ser emitida o absorbida en forma de radiación electromagnética. La ecuación que expresa este fenómeno es la siguiente:

$$E = h \nu$$

donde E es la energía de un cuanto emitido (en Joules), h es la constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Joules x segundo) y ν expresa la frecuencia de la radiación (en Hertz o segundo⁻¹). De acuerdo, entonces, con la teoría de Planck, la energía siempre se intercambia en múltiplos enteros de $h \nu$.

Aunque la teoría ondulatoria es generalmente correcta cuando describe la propagación de la luz y de otras ondas electromagnéticas, falla al explicar otras propiedades de la luz, especialmente su interacción con la materia. En 1905, sólo cinco años después de que Planck presentara su teoría de los cuantos, Einstein la utiliza para resolver los interrogantes planteados por el *efecto fotoeléctrico* descubierto por Hertz quien, investigando la descarga eléctrica entre dos electrodos, observó que la misma aumentaba cuando se iluminaban los electrodos con luz ultravioleta. Este efecto puede explicarse de un modo sencillo mediante un modelo de partículas para la luz. De este modo, Einstein generaliza las conclusiones de Planck: la energía no sólo *se intercambia* en cantidades discretas, sino que también *se propaga* de la misma manera. Esto significa que la energía sólo existe y se manifiesta en cantidades discretas. Los cuantos de luz pasan a denominarse ‘*fotones*’: la energía de un fotón está relacionada con la frecuencia de la onda luminosa mediante la ecuación de Planck. Debido a estos fenómenos comenzó a afirmarse que la luz posee tanto propiedades corpusculares como propiedades ondulatorias.

La existencia de partículas elementales como los fotones, concebidos como cuantos o "paquetes" de energía, plantea nuevos desafíos para la interpretación del concepto de energía. Los fotones son partículas sin masa, que se caracterizan por su frecuencia y su energía, magnitudes que se encuentran estrechamente relacionadas por la ley de Planck. En el caso de los electrones o de otras partículas subatómicas con masa, la energía también se encuentra cuantificada y se relaciona con una frecuencia; pero puesto que se trata de entidades con masa, la energía podría, en principio, seguir interpretándose como una propiedad de una entidad sustancial. Pero en el caso de los fotones, la concepción de la energía como propiedad se enfrenta con el inconveniente de explicar cuál es la entidad que sirve de sustrato a la energía. En otras palabras, los fotones parecen no ser más que "paquetes" de energía que se desplazan a la velocidad de la luz. En consecuencia, en mecánica cuántica la energía parece "sustancializarse".

En la actualidad, los problemas relacionados con los fundamentos de la mecánica cuántica ya no se discuten en términos de la tradicional "dualidad onda-partícula" sino sobre la base de la estructura formal de la teoría. Los análisis han puesto de manifiesto la esterilidad de intentar comprender el mundo cuántico mediante conceptos clásicos, aún admitiendo los límites de su aplicabilidad. Por ello, los estudios actuales adoptan como punto de partida el formalismo de la teoría junto con una interpretación mínima que, en general, no es cuestionada por las diferentes interpretaciones. En este contexto, los observables del sistema, esto es, propiedades como la posición, el momento cinético o el *spin*, son representados mediante operadores autoadjuntos sobre un espacio de Hilbert. En particular, la energía es representada mediante un operador, el hamiltoniano del sistema, que también interviene en la ecuación dinámica —la ecuación de Schrödinger— que rige la evolución temporal del sistema cuántico. Esto convierte al operador hamiltoniano en un operador que cumple un papel especial en la descripción del sistema. No obstante, se trata de un operador más y, por lo tanto, representa un observable del sistema. No hay, entonces, razón alguna para pensar que la energía posee una categoría ontológica diferente de la de otras propiedades del sistema cuántico como la posición o el momento cinético. ¿Significa esto que la sustancialización del concepto de energía que sugería la existencia del fotón era sólo aparente, y que se debe volver a la tradicional concepción de la energía como propiedad?

Lamentablemente, en el mundo cuántico las respuestas nunca son tan sencillas. La estructura de la mecánica cuántica impone necesariamente una *predicación contextual*: esto significa que sólo es posible predicar propiedades de un sistema cuántico dentro de un contexto. En otras palabras, la mecánica cuántica impide la predicación omnimoda: las predicaciones correspondientes a diferentes contextos no pueden yuxtaponerse de un modo clásico. Por este motivo, algunos autores sostienen que la noción clásica de propiedad debe ser abandonada en el ámbito cuántico (Hughes, 1989). Desde otra perspectiva, podría pensarse que lo que se disuelve es la propia noción de objeto como entidad sustancial que subyace a las propiedades (Costa, 2002). Pero, de cualquier forma, si la energía es uno de los observables del sistema, ya no puede pensarse ni como sustancia ni como propiedad a la manera clásica: el tradicional enfrentamiento entre las concepciones de energía como sustancia y energía como propiedad pierde su sentido original al

ingresar al mundo cuántico. Por lo tanto, será necesario comprender previamente la estructura de la ontología cuántica para decidir cuál es la nueva categoría ontológica de la energía.

Conclusiones

Los conceptos científicos, cuanto más generales, resultan más abstractos. El concepto de energía, con su aplicación interteórica, es el más general de la física contemporánea. Por este motivo, se trata de un concepto fuertemente abstracto que en la actualidad ha perdido por completo las relaciones con las nociones de "fuerza", "vigor" o "potencia" que poseía en la antigüedad y que aún sigue manteniendo en el lenguaje cotidiano. Pero es precisamente el alto nivel de abstracción y generalidad del concepto lo que plantea las mayores dificultades para su interpretación. La complejidad del problema llevó a Richard Feynman a admitir que la física actual desconoce qué es la energía (Feynman *et al.*, 1977, 4-1).

Así, la pregunta '¿Qué es la energía?' continúa planteando profundos interrogantes a quienes intentan comprender cuál es el referente ontológico de un concepto que se ha convertido en un elemento central de la física de nuestro tiempo.

Referencias

- Bunge, M., (1977), *Treatise on Basic Philosophy. Ontology I. The Furniture of the World*, Volume 3, Dordrecht-Reidel, Dordrecht.
- Bunge, M., (1999), "La energía entre la física y la metafísica", *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol.12 (1), pp.53-56.
- Costa, A. (2002), "Complementariedad y Contextualidad en la Interpretación de la Mecánica Cuántica", *Epistemología e Historia de la Ciencia (Selección de Trabajos de las XIV Jornadas)*, Vol. 10 (2004), Nº 10.
- Feynman, R., Leighton, R., Sands, M., (1977), *Física: Mecánica, radiación y calor*, Addison-Wesley Iberoamericana, Delaware, Volúmen I.
- Hughes, R. I. G., (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard University Press, Cambridge MA.
- Jammer, M., (1963), "Factorisation of Energy", *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol XIV (53), pp 160-166.
- Jammer, M., (1967), "Energy", En: *The Encyclopedia of Philosophy*, Edwards, P (Ed.), Vol I, McMillian Publishing Co., New York.
- Lindsay, R. B., (1975), "The Concept of Energy and Its Early Historical Development". En: *Energy: Historical development of the concept*, Lindsay, R.B. (Ed.), pp.13-23. Dowden, Hutchingon & Ross, Inc.
- Ostwald, W., (1902), *Vorlesungen über Naturphilosophie*, Veit & Comp, Leipzig.
- Torretti, R., Mosterín, J., (2002), *Diccionario de Lógica y Filosofía de las Ciencias*, Alianza, Madrid.