

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XV JORNADAS

VOLUMEN 11 (2005)

TOMO I

Horacio Faas

Aarón Saal

Marisa Velasco

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



La camaleónica noción de energía entre los siglos XVII y XIX

Maximiliano Lantz / Vicente Menéndez*

Es importante constatar que, en la física de hoy, no sabemos lo que es la Energía.

Richard Feynman

1. Introducción

Se puede acordar o discrepar con la expresión de Feynman, mas no es menos cierto que existe una entidad camaleónica¹ llamada *energía* que puede variar de una a otra forma, pero de la cual no podemos, en realidad, dar una definición conceptual completamente satisfactoria. Es decir, no sabemos *qué es* la energía en el sentido ontológico. Parece no poder ser descrita genéricamente sin tener que recurrir a descripciones de cada una de sus diferentes manifestaciones. Las definiciones que mejor se adaptan son aquellas que informan acerca de *cómo medirla*, o sea definiciones operacionales.

El presente trabajo tratará de analizar la evolución histórica que tuvo este concepto físico a lo largo del tiempo y en qué preciso momento la *fuerza newtoniana*, idolatrada como deidad absoluta y única realidad ontológica presente en el universo, tuvo que dejar paso al nuevo dios que los científicos llamaron *energía*. La noción fue sugerida por Descartes, se transfirió a Huygens, después a Leibniz, y luego, en la segunda mitad del siglo XVIII, apareció con el estruendo de la Revolución Industrial hasta obtener su formulación actual en la segunda mitad del siglo XIX, en pleno clímax newtoniano.

El término "energía" nos es tan familiar que habitualmente se cree saber perfectamente de qué se trata el mismo, e incluso tememos que algún día pueda agotarse. Proviene del griego, y traducido literalmente significa "en marcha". Pero la evolución histórica de este concepto no es simple. Creemos que debió implicar entre otras cosas un cambio en la imagen de lo que pudiese ser entendido como la *entidad física fundamental*. En todo caso, "la introducción del concepto de energía significa la emergencia de lo abstracto en la física" (Atkins, 110).

2. Buscando un ente fundamental

La noción de que, aunque sea en apariencia, es imposible crear una cantidad ilimitada de fuerza, así como la de obtener una maquinaria que funcione eternamente o lograr que se mueva un cuerpo sin ningún esfuerzo, proviene de antiguo. Ello, sumado a diversas consideraciones teológicas que analizaremos más adelante, fue generando la idea, algo intuitiva en un comienzo, de que debía existir alguna magnitud física relacionada con el movimiento que se conservase. Esta entidad podía ocultar una realidad ontológica fundamental y podía ser el verdadero y único ente real con el que estaban hechas todas las cosas que componen el

* Universidad de Buenos Aires.

universo. De allí que la mayoría de los filósofos naturales dedicaran buena parte de su tarea a encontrar una entidad de tal naturaleza.

Para Descartes, Dios es la causa primigenia del movimiento, y por tanto este último debe conservarse. Así, pues, elabora un concepto de cantidad de movimiento como lo que hoy llamaríamos "el producto $m.v$ ", pero sólo como ente escalar. A ese producto, Descartes lo asocia con una magnitud fundamental que debe conservarse en todo el universo. El hecho de que sea un escalar no convence a Huygens, ya que, para que tengan sentido las leyes de choque con las que estaba trabajando, debía formularse como un concepto direccional y no puramente escalar. Precisamente, sus estudios de cuerpos en colisión lo llevaron a la conclusión de que había algo especial en el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad. Esta última idea es la que infatigablemente y en detalle elaboró Leibniz. En el marco de una histórica controversia con los cartesianos acerca del concepto de fuerza, publicó el famoso artículo "Breve demostración del memorable error de Descartes y otros sobre la ley natural por la que quieren que la cantidad de movimiento sea conservada por Dios siempre igual". Leibniz afirma en ese artículo, refiriéndose al "error" de Descartes de considerar equivalentes a la fuerza y a la cantidad de movimiento: "lo que yo llamo *fuerza* se conserva, mientras que no se conserva lo que otros han llamado por ese nombre" (Leibniz, 50). Y desarrolla a continuación el ejemplo de que, para que un cuerpo de masa 1 llegue a una altura de 4 unidades, se necesita la misma "fuerza" que para otro cuerpo de masa 4 alcance una altura de 1 unidad. La igualdad del producto $m.v^2$ en ambos casos es lo que le permite afirmarlo. Precisamente, a este producto Leibniz lo bautiza como *vis viva* (fuerza viva) para diferenciarla de la *fuerza muerta*, que no es otra cosa que el peso del cuerpo.

Es decir que con Leibniz aparece en primer lugar una diferenciación entre la "fuerza" del cuerpo en movimiento y la "fuerza" del cuerpo en reposo. Luego el filósofo alemán avanza hacia su principal concepción. esta fuerza viva es lo que se conserva. Hacia el final de su vida desarrolla el concepto metafísico de *monada* como ente capaz de almacenar la fuerza perdida en el universo y capaz también de devolverla.

De aquí en más, y ya en el siglo XVIII, los continuadores de Leibniz en el continente, como Johann Bernoulli y su hijo Daniel, entienden por "fuerza" a los conceptos de *fuerza viva* y *fuerza muerta* tal como Leibniz los había presentado en sus *Escritos de dinámica*. En Inglaterra, por el contrario, después de la publicación de los *Principia* de Newton, no se dudaba de que la verdadera magnitud llamada "fuerza" se expresaba como el producto $m.a$. Esta dicotomía perdurará hasta principios del siglo XIX.

3. El problema a finales del siglo XVIII y principios del XIX

Curiosamente, es en el continente, más precisamente en Francia, donde llegará a su clímax la mecánica newtoniana de la mano de J. L. Lagrange (1736-1813), quien prolonga y sistematiza la dinámica de Newton dándole la forma analítica que podríamos calificar de definitiva. Su *Mécanique Analytique* es el modelo que aún hoy se sigue usando en el seno de lo que se denomina "mecánica clásica". Por otra parte, el principio de mínima acción introducido por Fermat, sugerido por el propio Leibniz y finalmente establecido por P. de Maupertius (1698-1759), resultó

ser la base de este formalismo, disponiéndose de este modo de un principio de máxima generalidad capaz de resumir toda la mecánica en un único enunciado. Maupertius supuso, a la inversa de la mayoría de sus coetáneos, que en el universo todos los fenómenos deberían obedecer a un principio de economía, un *minimum*, y no al de conservación, creyendo ver en este punto una "indiscutible demostración de la existencia del Creador" (Lafuente y Peset, 124). En este contexto de profunda matematización de la mecánica newtoniana se alcanzó un grado excelso de perfección en la reducción al mínimo de expresiones utilizadas para plantear los problemas mecánicos más variados. El matemático irlandés W. R. Hamilton (1805-1865) fue uno de los que contribuyó decisivamente a ello. Basándose en los trabajos de Lagrange, hizo de la mecánica de Newton una confortable máquina de pensar. De todos modos, el problema ontológico de la "realidad última", de la naturaleza esencial de los fenómenos mecánicos, seguía sin dilucidarse.

Lo que resulta altamente curioso e interesante es que hasta aquí ningún físico habla de "energía" o al menos de la existencia de un producto de magnitudes físicas que se conservase en las transformaciones mecánicas. Más aun, lo más inquietante es que tanto en la formulación lagrangiana como en la de Hamilton se utilizan las expresiones matemáticas que hoy reconocemos claramente como "energía mecánica". En términos de Lagrange, lo que actualmente llamamos "lagrangiano" no es otra cosa que la diferencia entre la energía cinética y la potencial; y, en la formulación hamiltoniana, tenemos ni más ni menos que a la propia "energía mecánica" (cinética más potencial) como ecuación base de la cual se derivan las famosas ecuaciones canónicas de movimiento. En particular, lo que hacía (y hace aún) tan útil la formulación lagrangiana es que las ecuaciones de movimiento se pueden hallar más fácilmente por disponer de "integrales primeras" ya conocidas por ser estas últimas "constantes de movimiento". Pese a todo ello, tanto Lagrange como Hamilton concibieron a estas funciones matemáticas sólo como "artilugios" útiles y elegantes para el cálculo y por tanto no profundizaron su interpretación física.

Para entender por qué ocurrió ello, cabe hacerse la pregunta: ¿por qué no se había incluido en la mecánica newtoniana la idea de conservación, ya sea de la fuerza, ya de la energía, como punto de importancia vital? W. Berkson, en otro contexto pero con un interés similar, se plantea esta misma pregunta y sugiere que hay dos razones para que los neonewtonianos no advirtieran en las ideas de conservación nada especial. La primera de ellas, nos dice Berkson, es que la mecánica newtoniana era completa en sí misma y así, un sistema que respondiese a un problema de fuerzas conocidas queda completamente determinado por las leyes de Newton. La otra razón, tal vez la de mayor peso filosófico, es que al menos en la visión de ciertos científicos (como por ejemplo Faraday) una teoría basada en una ley de conservación de la fuerza entraría en franca contradicción con la mecánica de Newton. Así pues, según Berkson, "la necesidad de una teoría de la conservación de la fuerza sólo se hizo sentir cuando se intento generalizar la teoría de Newton de forma que incluyera las fuerzas eléctricas, el magnetismo, el calor, las fuerzas químicas, la cohesión, etc. Fue entonces cuando empezó a ser de utilidad la idea de la fuerza como sustancia que se conserva y que puede aparecer

de diferentes formas" (Berkson, 86). A fines del siglo XVIII, se tenía una idea intuitiva de que "algo" se conservaba en el movimiento de los cuerpos, pero en qué podía consistir ese "algo" resultaba aún no discernible. Claramente, no podemos hablar de que se tuviese el "concepto" de energía. Tal vez resulte útil para comprender este proceso recordar, como analogía, lo sucedido con el concepto de *ímpetu* y *velocidad* a fines de la Edad Media. Resulta sumamente interesante advertir nuevamente cómo el contexto influye en las teorías científicas. Si bien Lagrange y Hamilton habían arribado al concepto "matemático" (si se nos permite el abuso de lenguaje) de la energía, ni ellos, ni casi ninguno de sus contemporáneos reparó en la importancia de la noción física que encerraban sus ecuaciones, porque el contexto en el que trabajaban no lo requería. La mecánica del hijo dilecto de Dios, Newton, era autónoma, y no reclamaba más entidades que las que el propio autor de los *Principia* había presentado.

El término "fuerza" era usado en un sentido amplio. Pese a que Newton lo había definido bastante rigurosamente y su mecánica se basaba en él, se utilizaba también en un sentido más próximo a lo que hoy conocemos por "energía". Sin embargo, esto aumentaba la confusión. Personajes como Boscovich, Ørsted o Faraday se volcaron hacia la búsqueda de una "fuerza" que se conservase, con la esperanza de hallar en ésta la entidad última de la naturaleza. Esta concepción metafísica sería la guía fundamental de varios trabajos realizados a principios del siglo XIX, en particular los de Faraday, quien creyó ver en la fuerza la única entidad real existente y en su conservación la ley fundamental de la física. Ahora bien, la búsqueda de una magnitud universal que se conservase y en cuyas propiedades se encuentran las causas de la luz, el calor, la electricidad, el magnetismo y las uniones químicas motivó el pensamiento de varios científicos de principios del siglo XIX, quienes lentamente comenzarían a desdoblarse el concepto de fuerza: uno vinculado al agente que provoca el cambio en el estado de movimiento, tal como lo había concebido Newton, y otro el que hoy identificamos como energía.

Fue el médico y físico inglés T. Young (1773-1829) quien, en 1807, con la Revolución Industrial en desarrollo, propuso por primera vez llamar *energía* y no *fuerza viva* al término $m.v^2$. Reconociendo, tal como lo había hecho anteriormente Leibniz, que la "fuerza" ejercida por un cuerpo en movimiento aumenta 4 veces si se duplica la velocidad, sugirió que dicho producto no podía ser llamado *fuerza* en sentido newtoniano. Mas el término *energía* no prosperó, muy probablemente debido a las circunstancias ya antes mencionadas.

Poco después, comenzaron a dar a luz los resultados de la metafísica de Boscovich, Ørsted y Faraday. En particular, los aportes de éste en el área de la electricidad dieron nuevos bríos a la idea de que la fuerza se conservaba. Era fácil demostrar experimentalmente que a partir de una reacción química se obtenía electricidad, con esta última, magnetismo, y con éste nuevamente electricidad, con la que se podía recargar una batería, o bien, lo que era todavía más impresionante, ¡generar movimiento! Y esto no era todo. Faraday demostró que con el movimiento mecánico también es posible obtener electricidad y así otra vez completar el ciclo. Más aun, el mismo Faraday probó experimentalmente la influencia de la electricidad sobre la luz y Joule mostró sus efectos térmicos. Todo esto parecía con-

cluyente: había una entidad, una suerte de "fluido universal" que se conservaba. Es en este punto en que los físicos se dividieron entre aquéllos que insistían en que esta entidad era la fuerza y los que pensaban que era otra entidad física.

En 1820, Gaspard Coriolis (1792-1843) retomó el término *energía* propuesto por Young y estableció que siempre que se la defina como $\frac{1}{2}mv^2$ se la podía relacionar con el concepto de "trabajo", elaborado por los físicos a finales del siglo XVIII como el "producto de la fuerza por la distancia". Lazare Carnot (1753-1823), padre de Sadi Carnot, en un trabajo titulado *Ensayo sobre las máquinas* (París, 1803) fue quien por primera vez analizó las relaciones entre la *vis viva* leibniziana y el producto $P \cdot d$ que define el "trabajo" y que incluye a la "fuerza muerta" de Leibniz.

4. La energía en la segunda mitad del siglo XIX

La fuerza viva de Leibniz se transformó en la llave para acceder al moderno concepto de *energía cinética*, término este último acuñado por William Thompson (1824-1907), Lord Kelvin desde 1892, quien, si bien en 1846 escribió "la física es la ciencia de la fuerza", en 1851 proclamaría: "la energía es el principio primario". Para ese entonces, comenzaba a quedar claro que se puede realizar trabajo sin que se convierta de inmediato en energía cinética. Esta "energía almacenada", recuperable en función de la posición de un cuerpo y relacionada con una fuerza, es la *energía potencial*, nomenclatura propuesta por W. Rankine (1820-1872). Así pues, quedaba al descubierto que la suma de la energía potencial más la cinética, justamente aquella función hallada por Hamilton, resulta invariante en un movimiento sometido a la acción de fuerzas centrales que puedan derivarse de un potencial. En este contexto, Helmholtz (1821-1894) advirtió en 1847 que aquella era la entidad fundamental que los físicos habían estado buscando. Reconoció también la relación entre el principio de conservación de la energía y el de mínima acción, entendiendo al fin el significado profundo de aquellas ecuaciones tan elegantes halladas por Hamilton y Lagrange. Helmholtz, entonces, le asignó un significativo sentido físico tanto a la energía como a la acción, explicando en 1886 que un sistema mecánico en evolución selecciona, entre los procesos posibles que pueden llevarle de un estado a otro, aquél para el cual la diferencia de la energía cinética y la potencial tenga, durante el tránsito, el menor valor posible, es decir que la acción sea mínima. Era la primera interpretación energética de la idea de "acción" y de las "integrales primeras" de la formulación lagrangiana.

Por la misma época, casi simultáneamente, Joule y Mayer llegan a conclusiones similares a la de Helmholtz, si bien por caminos totalmente distintos. Era el triunfo de la metafísica de Faraday, pero amoldada, reformulada y desarrollada hacia un común acuerdo entre la mecánica newtoniana y la conservación de una nueva e importantísima entidad física. Finalmente, el concepto de energía, tal como lo conocemos hoy, había encontrado su lugar en la comunidad científica.

Hubo que esperar, entonces, al desarrollo final de la mecánica newtoniana y de la difusión de la Revolución Industrial (que motivó en particular los estudios sobre las máquinas térmicas) para que los físicos empezasen a trabajar con un concepto escurridizo pero tan fértil a la hora de entender el funcionamiento de la naturaleza, sobre todo a partir de la idea de su conservación. Esa clave, que para Descartes radicaría en la *cantidad de movimiento*, para Leibniz en la *fuerza viva* y

para Faraday en la *fuerza*, aparecía, ya avanzado el siglo XIX, en el concepto de *energía*. A fines de dicho siglo un destacado grupo de físicos, entre ellos Mach y Ostwald, concebirían a la energía como la realidad física última².

5. Conclusiones

Quizás lo más impactante del desarrollo histórico de la noción de energía y su conservación haya sido lo siguiente:

1. que se siguiese usando la palabra "fuerza" durante casi un siglo, en lugar de "energía", siendo que la fuerza estaba perfectamente definida; y
2. que tanto Lagrange como Hamilton no advirtiesen que el principio de conservación de la energía estaba a su alcance, y fuese, entre otros, un médico (Mayer) quien lo descubriese.

Podemos arriesgar una interpretación coherente acerca de por qué ocurrió todo ello a partir de estas consideraciones:

1. El objetivo, tanto de Lagrange como de Hamilton, fue solamente el de mejorar matemáticamente la mecánica newtoniana, puesto que ésta era filosóficamente completa y no requería de nuevas entidades para su interpretación física. No habiendo una necesidad de tal naturaleza, el concepto de energía, como tal, pasó inadvertido.
2. En el marco socioeconómico de la Revolución Industrial, en la comunidad científica el concepto de "trabajo" era fundamental. Este concepto se ligaba muy bien con las diversas y parciales formas que para la época había tomado el de energía, y por lo tanto existía ahora la necesidad de desarrollar esta última idea rigurosamente. Lo advertimos ya sea en el desarrollo de la termodinámica, o bien por la utilización del concepto de energía en campos muy diversos como el la electrodinámica de Maxwell, las transformaciones químicas y las funciones fisiológicas de los organismos vivos.
3. Asimismo, la vieja idea metafísica de que alguna entidad asociada con el movimiento se debe conservar, en el seno de un positivismo decimonónico cada vez más predominante, dio el marco para que fraguara una interpretación conceptual y no simplemente "operativa" de la energía. Es decir, se encontró en la energía "la entidad que constituye al mundo", siendo ella algo perfectamente definible y medible. Esta visión era completamente imposible de ser lograda en el contexto histórico de Lagrange o Hamilton.

Así pues, en cuestión de pocos años, un concepto que surgió de la intuición por la necesidad de encontrar una entidad invariante que refleje, ya sea el orden del universo o la perfección del Creador, pasó delante de las narices de los más grandes fisicomatemáticos del Siglo de las Luces y sobrevivió a la confusión con el más sólido de los conceptos introducidos por Newton. Finalmente, le llegó la hora de entrar en escena, donde indiscutiblemente ganó un protagonismo que hoy continúa sólidamente unido, ya no con la física, sino con toda la ciencia, siendo, sin temor a exagerar, uno de los conceptos más importantes que permiten desarrollar el conocimiento científico.

Notas

¹ Esta calificación se encuentra en Hecht, 186.

² Sobre el energicismo, véase Capek, 114-121.

Bibliografía

Atkins, P., *El dedo de Galileo*, Madrid, Espasa, 2003.

Berkson, W., *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*, Madrid, Alianza, 1981.

Capek, M., *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid, Tecnos, 1973.

Hecht, E., *Física en perspectiva*, Wilmington, Adisson Wesley Iberoamericana, 1987.

Janmer, M., *Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics*, Harvard University Press, 1957.

Lafuente, A. y Peset, J. L., *Moreau de Maupertuis. El orden del Cosmos*, Madrid, Alianza, 1985.

Leibniz, G. W., *Escritos de dinámica*, Madrid, Tecnos, 1991.