



Conexões filosóficas do conceito de energia

Ricardo Lopes Coelho¹

O que é isso, que se não cria, não se perde, apenas se transforma e chamamos energia?

O Prêmio Nobel da física Richard Feynman dizia, ser importante ter consciência de que na física de hoje não temos um conhecimento do que seja a energia. Outros físicos têm corroborado a dificuldade (Bergmann e Schaefer 1998, Dransfeld, Kniele e Kalvius 2001). Esta leva-nos a pensar que os meios próprios da física não conduzem, ou pelo menos ainda não conduziram, a um significado, universalmente aceite, de energia. Haverá outra via?

A história da ciência ensina-nos que a energia foi descoberta por quatro jovens nos meados do séc. XIX. Nenhum deles tinha 30 anos, quando escreveu o primeiro artigo, pelo qual lhe é atribuído mérito da descoberta. Também nenhum deles era físico: Robert Mayer era médico; James Joule fazia experiências em casa, por mero interesse; Ludvig Colding era um recém-diplomado da Escola Politécnica de Copenhaga, ainda sem emprego; Hermann von Helmholtz era médico do exército.

Para além do que a história da ciência nos ensina, Mayer e Joule são amiúde referidos nos manuais de física. Se aquilo que estes autores fizeram é ainda hoje considerado em ciência como “descoberta da energia”, então talvez seja útil saber, o que é que eles fizeram, pois aí deverá residir a origem do que chamamos energia.

O presente texto resulta duma investigação, cujo programa consistia em usar a história da ciência, para tentar perceber o que os descobridores da energia *de fato* descobriram. Desse modo, passar-se-ia a dispor de informações, que os físicos habitualmente não dispõem. Com outros dados, já não seria de admirar que se chegasse a novos resultados (Coelho 2006, 2009, 2010). Na presente comunicação é principalmente posta em relevo uma das funções da filosofia na ciência, ela servir de base às teorizações da experiência. Como iremos ver, os autores recorreram a um conhecimento prévio à experiência, para interpretarem e organizarem a interpretação dos fenômenos. O número de

¹ Ricardo Lopes Coelho é professor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

6 estudos sobre esta função da filosofia no caso da energia é extremamente reduzido, o que representa uma oportunidade para um estudante.

Causa aequat effectum

O artigo dos *Anais de Química e Farmácia* de 1842, “Observações sobre as forças da natureza não viva”, coloca Robert Mayer na história da descoberta do princípio de conservação da energia. O autor parte da proposição “forças são causas” e do princípio ou lema “*causa aequat effectum*”.

Sendo a força causa, e a causa igual ao efeito, a força inicial num fenômeno seria igual à força final. Assim, por exemplo, se agitarmos, veementemente, água contida num tubo de ensaio durante um certo tempo, o que Mayer fez, verificaremos um aumento da temperatura da água. Aquilo que fazemos é movimento; o que resulta é calor. Aquele movimento é visto como a causa, e o calor como efeito. O movimento corresponde à dita força inicial e o calor à força final.

Como a força inicial é igual à final, o autor atribui à força uma propriedade, a indestrutibilidade. Como a força inicial desaparece para dar origem à final, as forças gozariam duma outra propriedade, a transformabilidade.

Façamos uma breve ligação com o presente. O princípio de conservação da energia é amiúde apresentado nos manuais universitários na forma “a energia não se cria nem se perde, apenas se transforma”. Uma relação com Mayer poderia estabelecer-se nos seguintes termos. Com a primeira parte da proposição, “a energia não se cria nem se perde”, relaciona-se a indestrutibilidade da força, pois em ambos os casos se está a dizer que força ou energia se conservam em quantidade. A transformabilidade da força corresponderia à segunda parte da formulação, “apenas se transforma”.

Se se admite esta relação, compreende-se que se atribua a Mayer a descoberta do princípio. A ser assim, o princípio de conservação da energia teria por base o lema de Mayer, “*causa aequat effectum*”, ou o seguinte.

Ex nihilo nil fit

Em 1845 Mayer publica uma brochura a expensas próprias, *O movimento orgânico em conexão com o metabolismo*. Tal como em 1842, a força transforma-se e

10 conserva-se. Mayer parte, porém, aqui dum outro princípio ou lema: “*ex nihilo nil fit; nil fit ad nihilum*”. Vejamos como ele o usa.

Tomemos para exemplo a máquina-a-vapor, que era crucial na indústria e importante na ciência do tempo. No essencial, o funcionamento da máquina começa com o aquecimento dum fluido, que por dilatação origina movimento. Tendo em conta os elementos de observação - aquecimento e movimento resultante – e o lema “do nada nada vem” e “nada se torna em nada”, compreende-se que o fenômeno seja interpretado nos seguintes termos: o calor é a causa do movimento. Com efeito, observou-se um movimento, que pelo lema não pode provir do nada; forneceu-se calor, que, pelo mesmo lema, não se torna em nada.

Pela teoria de Mayer, o calor é uma força e o movimento também, pelo que uma força se transformou noutra. Por via duma equação é estabelecida uma relação entre unidades de calor e de movimento, e calculado o equivalente mecânico do calor.

Diferentemente do artigo de 42, o escrito de 45 engloba os seres vivos. Assim, por exemplo, as plantas mostrariam uma certa atividade, mas apenas se dispõem de luz solar, pelo que a sua atividade não decorreria do nada. No caso dos animais, seria a força química dos alimentos e do oxigênio absorvido pela respiração que estaria na origem dos movimentos que realizam e do calor que desenvolvem. Os domínios orgânico e inorgânico ficariam, em suma, subsumidos pela mesma teoria.

Façamos uma breve reflexão. Os lemas “*causa aequat effectum*” e “*ex nihilo nil fit*” não provêm dos fenômenos estudados. São antes elementos em função dos quais é abordada a experiência. Quando Mayer designa a causa e o efeito por força, está a teorizar. Tem por base uma interpretação da experiência e, por finalidade, equalizar em quantidade as entidades envolvidas – calor e movimento. Se as características da força são transferidas para a “energia”, compreende-se a dificuldade em entender a energia pela experiência. Se um físico pergunta pelo ser da energia e a procura nos fenômenos, estará a pressupor algo real nos corpos, que seria a sua energia. Como a concepção não foi haurida dos fenômenos, ou seja, o termo energia não foi criado para ser referente dum coisa, não se poderá esperar encontrar essa coisa nos fenômenos. Assim, compreende-se que se não saiba o que é a energia.

O conceito de substância



O calor não é substância, mas movimento. É a tese que Joule 1843 defende no artigo que o colocou entre os autores da descoberta da conservação da energia. James Joule era um jovem que se interessava por desenvolver máquinas que produzissem corrente elétrica graças ao movimento dum ímã. O fenômeno tinha sido descoberto por Faraday em 1831. Os primeiros trabalhos de Joule são ainda dos anos 30.

Em 1843, Joule publica um artigo no *Philosophical Magazine*, “Sobre os efeitos caloríficos da magneto-eletricidade e sobre o valor mecânico do calor”. Magneto-eletricidade era a designação dada para a corrente elétrica que surge por movimento dum ímã. Como nestas experiências, primeiramente se coloca o ímã em movimento e depois surge corrente elétrica, esta era chamada magneto-electricidade. Se a corrente elétrica estivesse *primeiro*, se, por exemplo, a passagem da corrente estivesse na origem dum movimento da agulha magnética, o fenômeno era dito eletromagnetismo. Na experiência magneto-elétrica realizada por Joule, é tido em conta a corrente e o calor por ela desenvolvido, daí constar no título “efeitos caloríficos da magneto-eletricidade”.

O trabalho de Joule é experimental, mas ligado a uma questão teórica: se o calor é substância ou movimento. Se o calor for substância, a quantidade de calor terá de ser constante. Isto significa que se surgir calor numa parte da máquina magneto-elétrica, ele deverá desaparecer numa outra parte. Se tal não acontecer, o calor não pode ser substância. Por isso, Joule pretende testar se o calor que se verifica com a magneto-eletricidade é “transferido”, vindo duma parte da máquina para outra, ou é “gerado”.

As experiências mostraram que o calor surgiu numa parte da máquina, que se encontrava termicamente isolada. Logo, o calor não pôde provir das outras partes. Sendo assim, o calor foi gerado. Logo, não pode ser uma substância. Se não é uma substância, terá de ser movimento, de acordo com a ciência do tempo, como iremos ver adiante. Uma vez que a máquina magneto-elétrica é capaz de “gerar” calor por meios simplesmente mecânicos, Joule tenta determinar uma relação numérica entre movimento e calor. Mais exatamente, pretende saber que poder mecânico é necessário, para obter uma dada quantidade de calor. Esta quantidade é o *equivalente mecânico do calor*, um elemento crucial na afirmação do princípio de conservação da energia.

A questão de o calor ser “ou substância ou movimento” é colocada por vários autores nos finais do séc. XVIII e inícios do seguinte. Berthollet, por exemplo, tinha defendido que o calor era substância e realizou um trabalho experimental para prová-lo. Para Rumford, o calor era movimento, o que também justificava com trabalho

12 experimental. Vários autores, ao longo da primeira metade do séc. XIX, tentaram tratar a questão por via experimental. Como segundo a ciência da época, o calor só poderia ser “ou substância ou movimento”, a negação duma das características era suficiente para afirmar a outra. Como a experiência de Joule mostrou que o calor variou em quantidade, seguia-se o calor ser movimento.

Em Junho de 1845, Joule deu a conhecer outra forma de determinar o equivalente mecânico do calor. O mecanismo utilizado consiste numa roda-de-pás imersas em água. Sendo as pás colocadas em movimento, impulsionam a água. O recipiente continente da água e da roda é, porém, construído de modo a permitir a rotação das pás, mas a obstaculizar a rotação da água. Assim, uma parte do fluido embate em placas solidamente ligadas às paredes do recipiente, o que provoca fricção. A roda-de-pás é impulsionada por pesos em queda.

A experiência consiste em deixar cair os pesos e apreciar a temperatura da água antes e após a queda. Como a roda se move em virtude da queda dos pesos, Joule estabelece uma relação entre o poder mecânico e o calor desenvolvido. A relação numérica fornece o equivalente mecânico do calor.

Joule refere-se à experiência como um fenómeno de conversão, de poder mecânico em calor. Mas o local, onde a conversão teria lugar, não é objeto de investigação. A conversão do movimento visível dos pesos no movimento invisível, em que consistiria o calor, é, por conseguinte, interpretação.

Númeno e fenómeno

Em 1847, Helmholtz apresentou uma comunicação na *Sociedade Física de Berlim*, “Sobre a conservação da força”, que viria a ser publicada no mesmo ano a expensas próprias. O cerne do escrito reside na tese de existirem duas forças últimas na natureza, cuja soma é constante. Vejamos como o autor fundamenta a tese.

A ciência consideraria os objetos do mundo exterior segundo uma dupla abstração, matéria e força. A dupla “matéria-força” espelha a dupla kantiana “númeno-fenômeno”.²

2 Vários estudos foram realizados sobre a influência de Kant no artigo de Helmholtz (Elkana 1974, Heimann 1974, Fulliwinder 1990, Bevilacqua 1993). O termo ‘influência’ é demasiado lato, pois poderá sugerir que a filosofia de Kant tenha conduzido Helmholtz no artigo de 1847. O que se verifica no texto é antes um recurso à parte inicial da *Crítica da Razão Pura*, para justificar uma abordagem dos fenómenos em termos de forças, que numa grande parte dos casos não são observáveis. A numenalidade, por um lado, e a “tarefa da ciência”, por outro, fundamentam o que Helmholtz levou a cabo no tratamento dos

3

Diz Helmholtz, a matéria como tal não tem efeitos nos nossos órgãos dos sentidos; os efeitos que os objetos exercem em nós são forças. Como a tarefa da ciência, de acordo com o autor, consiste na procura das causas últimas - as causas imutáveis dos fenômenos -, e os fenômenos chegam até nós pela força, a remissão dos fenômenos às causas últimas, conclui Helmholtz, traduz-se na remissão a forças imutáveis.

“Forças imutáveis” seriam algo que chega aos nossos órgãos sensoriais de forma invariável no tempo. Ora, o que nos chega de forma invariável no tempo seriam qualidades permanentes da matéria. Helmholtz identifica-as com os elementos da química.

Supondo o mundo constituído por elementos, que por si não mudariam, a mudança só poderia provir do movimento. Se se supuserem apenas dois corpos, o movimento relativo seria de aproximação ou afastamento (a rotação não é considerada). Compreende-se que as forças justificativas destes movimentos sejam atrativas ou repulsivas.

Helmholtz conclui então que a tarefa da ciência consiste em explicar os fenômenos pelas duas forças fundamentais seguintes: as forças de tensão, que são atrativas ou repulsivas, e as forças vivas, que são as de movimento. O movimento teria origem nas forças de tensão, e modificaria estas. A variação das forças de tensão e das forças vivas estaria correlacionada, se uma aumentava, a outra diminuía. A quantidade total conservar-se-ia constante.

Do ponto de vista filosófico, Helmholtz elaborou, portanto, um esquema conceitual que aplica ao observável e ao invisível. No caso dum corpo que cai, as forças últimas eram visíveis; no caso do calor, não eram. Aí eram imaginadas.

Calor: substância ou movimento

William Thomson tomou conhecimento dos trabalhos de Joule durante o encontro da Associação Britânica de 1847. Ele encontrava uma dificuldade incontornável na tese da conversão do calor em trabalho: ela contraria a teoria de Carnot. Segundo esta, o calor é substância.

A produção de efeito mecânico graças ao calor, próprio das máquinas industriais de então, era visto como “transmissão” de calor e não como conversão. O sentido de transmissão é exposto por analogia com a queda de água. Tal como num moinho, a queda de água origina efeito mecânico. Carnot teria mostrado que a “queda” de calor da fonte

fenômenos caloríficos e electromagnéticos. Ele atribuiu-lhes forças mecânicas inobserváveis. O tópico ‘Kant-Helmholtz’ ainda requer algum estudo.



quente para a fonte fria, através da máquina-a-vapor, permitiria obter um efeito mecânico.

A conversão de calor em trabalho é provavelmente impossível, dizia Thomson.

Em 1850, surge um artigo de Clausius que resolve a dificuldade de Thomson em conciliar os trabalhos de Joule e a teoria de Carnot. Clausius muda apenas o que dizia respeito àquela parte da teoria que era imaginada. Parte então do princípio de que existe um movimento das partículas, sem se interessar por qual, e altera na teoria de Carnot o que é incompatível com a conversão, a saber, a quantidade de calor manter-se inalterada na produção de trabalho. Como não existiam dados experimentais sobre a variação da quantidade de calor, não havia objeção experimental à sugestão de Clausius.

Em 1851, Thomson escreve um primeiro artigo, “Sobre a teoria dinâmica do calor”. Alguns dos seus pontos de vista tinham-se alterado. A teoria dinâmica do calor teria sido fundada por Humphrey Davy, em 1799, de quem cita a passagem “o calor é movimento”. As experiências de Mayer (1842) e Joule (1843) seriam suficientes, diz Thomson, para demonstrar a imaterialidade do calor. Num artigo de Dezembro do mesmo ano, também “Sobre a teoria dinâmica do calor”, define pela primeira vez energia.

Em 1852, Thomson defende a tese de existir uma tendência universal para a dissipação da energia utilizável, com base na argumentação seguinte. Nos fenômenos naturais verifica-se perda de energia utilizável. Ora, como só o Poder Criador pode criar ou aniquilar a energia, a perda consiste numa transformação. Logo, a transformação é dissipativa. (Em virtude da tendência universal para a dissipação da energia, Thomson concluiu ser a vida na terra limitada no tempo, o que viria a ter impacto na época).

Para precisar o sentido da dissipação, Thomson introduziu uma sistematização das “reservas” de energia. Existiriam dois tipos de reservas de energia, o *estático* e *dinâmico*. Esta distinção irá dar origem à energia cinética e potencial, proposta de Thomson e Tait em 1862.

Ato e potência, substância e acidentes

Em 1853, Rankine publica um artigo intitulado “Sobre a lei geral da transformação da energia”. Por energia é entendida toda a afecção da substância que seja um poder capaz de vencer resistências. Apresentado o termo, segue-se a caracterização das formas de energia em dois tipos: *atual* ou *sensível* e *potencial* ou *latente*.

Por energia atual é entendida a afecção da substância, cuja presença induz uma mudança de estado da substância. Ocorrendo a mudança, a energia atual desaparece, sendo

substituída pela potencial. O desaparecimento da energia potencial conduz ao aparecimento de energia atual na mesma proporção. A soma das energias do universo, atual e potencial, seria constante, o que expressava a conservação da energia.

Enquanto a sistematização de Thomson – reserva de energia estática e dinâmica – reflete um ponto de vista meramente mecânico – repouso ou movimento –, o recurso à terminologia aristotélica por Rankine torna o “estático” “potencial”, ou seja, atribui-lhe a tendência para passar a atual. Isto era mais adequado ao que se pretendia expressar. Por exemplo, uma pedrinha unicamente segura por dois dos nossos dedos cairá se for largada. Ora, a energia “estática” diz-nos que ela está em repouso, enquanto a “potencial” nos indica que ela tende a mover-se, se deixada a si.

Rankine desenvolveu a aplicação da filosofia aristotélica no artigo “Linhas gerais da ciência da energética”, 1855. A primeira parte do artigo é filosofia da ciência. Trata dos métodos de elaboração duma teoria científica. Existiriam dois: o abstrativo e o hipotético. Pelo método hipotético, imaginam-se movimentos e forças, que nos são ocultos, para explicar os fenômenos. O abstrativo recorre a propriedades dum conjunto de fenômenos. Para desenvolver a ciência da energia, Rankine usa o método abstrativo. A terminologia da teoria seria “puramente abstrata”, para poder valer em todos os domínios relacionados com a energia. Isto é conseguido por recurso à filosofia aristotélica, como iremos ver brevemente.

Por “substância” entende-se um corpo. Por “acidente” é designado todo o estado variável duma substância. Os acidentes podem ser “absolutos” ou “relativos”, conforme dependem somente da substância ou doutros corpos. O “esforço”, que é a causa que varia ou tende a variar um acidente, é dito acidente ativo. Aquilo que ele tende a fazer variar é dito acidente passivo. “Trabalho”, que é uma grandeza física, é re-definido neste contexto: é a variação dum acidente através dum esforço.

Por energia é entendido *o estado duma substância capaz de realizar trabalho*. Se essa capacidade de realizar trabalho depende da própria substância, ou seja, se se trata dum *acidente absoluto*, usa-se o termo “energia actual”; se a capacidade da substância de realizar trabalho depende doutras substâncias, se se trata, portanto, dum *acidente relativo*, usa-se o termo “energia potencial”.

A “capacidade de realizar trabalho”, usada por Rankine na definição de energia, surge em manuais atuais de física geral. Há, porém, uma diferença significativa. Enquanto para Rankine, se trata duma substância que tem a capacidade de realizar trabalho, na

atualidade, é a energia, ela própria, que tem essa capacidade. A energia pôde tornar-se no sujeito da ação, porque foi concebida como substância, por finais do séc. XIX.

Energia-substância

Em 1885, Lodge publica um artigo intitulado “Sobre a identidade da energia”. Segundo o autor, Poynting teria introduzido a ideia de continuidade na existência da energia num artigo de 1884. Isso representaria uma extensão do princípio de conservação, pois agora conhecer-se-ia a trajetória da energia, o que permitiria seguir uma dada quantidade de energia até ao seu aparecimento noutra forma. Vejamos como o autor usa a nova doutrina da conservação da energia num caso simples.

Se uma pedra cai, a energia potencial não é para ser concebida no grave nem na terra, mas no meio que as circunda. Seria este meio que pressionaria a pedra e a terra uma para a outra. O que então se dizia da queda dum grave, a energia transforma-se de potencial em cinética permanecendo na pedra, é para o autor sem sentido.

Em 1887, Planck propõe que se imagine a energia como uma espécie de reserva, como um capital. Esta concepção seria muito prática e de intuição fácil em virtude da analogia com a matéria. Embora Planck veja as vantagens da analogia entre matéria e energia, coloca a questão de se é legítimo conceber a energia como substância. Há desde logo uma dificuldade, o fato de se não poder assinalar um lugar à energia. Planck presume por isso que esta concepção da energia venha um dia a ser superada.

Segundo Hertz, 1894, a energética não estaria suficientemente madura para dar uma definição de energia. Porém, em função do uso dado ao conceito, ele depreende que a energia era concebida como substância. Acontece, todavia, continua Hertz, que a energia potencial goza de propriedades que contrariam o próprio conceito de substância. Enquanto que, por exemplo, a quantidade em substância dum dado sistema depende do estado do sistema, a energia potencial dum sistema depende da existência doutras massas, que podem mesmo estar a grandes distâncias.

O hiperconceito

Por “hiperconceito” entendo aqui o uso do conceito de energia, como se “tudo fosse energia”. Isto foi obra de Wilhelm Ostwald, Prêmio Nobel de química em 1909.

Em 1908, Ostwald publica *A energia*, em cuja introdução se lê, “a energia encarna

o verdadeiro real”. Tal é, para entender num duplo sentido, como é explicado: é o real porque é atuante no que acontece; e é real porque constitui o conteúdo dos próprios acontecimentos. Um tal conceito tenderá a eliminar outros conceitos englobantes, como matéria.

No *corpus* da obra é defendida a tese de que a energia torna a matéria supérflua. O cerne da argumentação reside no seguinte. As propriedades atribuídas à matéria podem ser expressas pelas formas de energia. Diz-se, por exemplo, que os corpos possuem massa e peso. Ora a massa corresponde a um dos fatores da energia de movimento e o peso é um fator da energia de gravitação. Logo, massa e peso têm expressão pela energia. Com as outras formas de energia - energia de volume, de superfície, etc.-, Ostwald consegue expressar em termos energéticos o que era atribuído à matéria.

Além disso, acrescenta, o conceito de energia está em condições de dar conta de propriedades dos corpos, como o calor ou as propriedades químicas, que não estão incluídas no conceito de matéria. Assim, o conceito de energia subsume o que era tido por matéria, como ainda as propriedades da matéria, que o conceito de matéria não incluía. Por isso, a “energia” seria suficiente e a “matéria” dispensável.

A energética estaria igualmente em condições de dar conta do ser vivo, nomeadamente do ser humano. As nossas impressões pelos sentidos, recepção pelos nervos e comunicação ao cérebro, poderiam ser explicados em termos energéticos. As impressões dos sentidos são tomadas como passagem de energia; a recepção pelos nervos é entendida como transformação de energia; a comunicação através dos nervos é interpretada como propagação de energia. A energia dos nervos é dita energia psíquica, cuja base seria energia química.

Uma vez que os fenómenos psíquicos podem ser dados em termos energéticos, o conceito de espírito é subsumido pela energia. Ora como o autor tinha mostrado, que o conceito de matéria era dispensável, conclui agora, que a energia permite ultrapassar o tradicional dilema da cultura ocidental, matéria e espírito.

O último capítulo da obra intitula-se a energética sociológica. Para ser clara a relação da energia com a sociedade, consideremos um caso simples. Quando se usa um pau para se chegar a algo, está-se a transformar a energia muscular, através da energia de forma do pau, e a comunicá-la lá, onde o pau chega. Conforme os fins e o desenvolvimento cultural das sociedades, os meios podem ser muito complexos: não apenas utensílios simples, mas animais, homens, máquinas, combustíveis, etc. Uma vez que, com a



transformação duma energia noutra, há diminuição da energia livre, Ostwald coloca como tarefa geral de toda a cultura, encontrar os coeficientes de transformação das energias mais favoráveis. O uso de coeficientes de transformação de energia deficientes, por vontade própria, seria moralmente reprovável, o que liga a energia com a ética. Nenhum conceito científico tinha chegado tão longe, como a energia pela mão do Prêmio Nobel de química de 1909.

Os Tópicos

Esta panorâmica do desenvolvimento do conceito de energia mostra-nos uma série de conexões com a filosofia. Por um lado, os autores recorreram a ferramentas filosóficas para interpretar os fenômenos, como a relação causa-efeito de Mayer. Por outro, recorreram à filosofia para elaborar as teorias, como o uso de Kant por Helmholtz ou de Aristóteles por Rankine. Além disso, definiram substância o que não varia em quantidade. Nos finais do século XIX, surgiu a ideia duma energia substancial. O significado do conceito de energia, esse se mantém problemático, a começar pelo fato de não sabermos o que é, segundo o Prêmio Nobel de física Richard Feynman.

Bibliografia

Barbosa, J. P. & Borges, A. T.: 2006, 'O Entendimentos dos Estudantes sobre Energia no início do Ensino Médio', *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **23**, 182-217.

Berg, K. C. De: 2008, 'The Concepts of Heat and Temperature: The Problem of Determining the Content for the Construction of an Historical Case Study which is Sensitive to Nature of Science Issues and Teaching-Learning Issues', *Science & Education* **17**, 75-114.

Bergmann, L. & Schaefer, C.: 1998, *Lehrbuch der Experimentalphysik I*. 11th edn. De Gruyter, Berlin, New York.

Bevilacqua, F.: 1983, *The Principle of Conservation of Energy and the History of Classical Electromagnetic Theory*. La Goliardica Pavese, Pavia.

Bevilacqua, F.: 1993 'Helmholtz' Ueber die Erhaltung der Kraft'. In D. Cahan (Ed.) *Hermann von Helmholtz and the Foundations of the Nineteenth-century Science* (pp. 291-333). Berkeley, Los Angeles and London: University of California Press.

Beynon, J.: 1990, 'Some Myths Surrounding Energy', *Physics Education* **25**, 314-316.

Breger, H.: 1982, *Die Natur als arbeitende Maschine: zur Entstehung des Energiebegriffs*

in der Physik 1840-1850. Campus Verlag. Frankfurt a. M., New York.

Caneva, K. L.: 1993, *Robert Mayer and the Conservation of Energy*. Princeton University Press, Princeton.

Cardwell, D. S. L.: 1989, *James Joule. A Biography*. Manchester University Press, Manchester.

Carnot, S.: 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Bachelier, Paris. (Rep. Éditions J. Gabay, 1990).

Çengel, Y. & Boles, M.: 2002, *Thermodynamics*. Mc Graw Hill, Boston [etc.].

Chalmers, B.: 1963, *Energy*. New York, London.

Clausius, R.: 1850, 'Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen', *Annalen der Physik* **79**, 368-97; 500-524.

Coelho, R. L.: 2006 *O Conceito de Energia: Passado e Sentido*. Instituto Rocha Cabral, Opus. Vol. II, Aachen: Shaker Verlag.

Coelho, R.: 2009 'On the Concept of Energy: How Understanding its History Can Improve Physics Teaching', *Science and Education* **18**: 961-983.

Coelho, R.: 2010 'On the Concept of Energy: History of Science for Teaching', in: Kokkotas P., Malamitsa K., Rizaki K.,(Eds) *Adapting Historical Knowledge Production to the Classroom*, Sense Publishers.com, Rotterdam/Boston/Taipei

Cotignola, M. I.; Bordogna, C.; Punte, G. & Cappannini, O. M.: 2002, 'Difficulties in Learning Thermodynamic Concepts: Are They Linked to the Historical Development of this Field?', *Science & Education* **11**, 279-291.

Cutnell, J. & Johnson, K.: 1997, *Physics*. J. Wiley, Canada.

Dahl, P. F.: 1963, 'Colding and the Conservation of Energy', *Centaurus* **8**, 174-188.

Davy, H.: 1799, *Collected Works*, 2. J. Davy (ed.). London, 1839.

Doménech, J. L.; Gil-Pérez, D. ; Gras-Marti, A. ; Guisasola, J.; Martínez-Torregrosa, J.; Salinas, J.; Trumper, R.; Valdés, P. & Vilches, A.: 2007, 'Teaching of Energy Issues : A Debate Proposal for a Global Reorientation', *Science & Education* **16**, 43-64.

Dransfeld, K.; Kienle, P. & Kalvius, G. M.: 2001, *Physik I: Mechanik und Wärme*. 9th edn. Oldenbourg, München.

Duit, R.: 1987, 'Should Energy Be Illustrated as Something Quasi-material?', *International Journal of Science Education* **9**, 139-145.

Elkana, Y. 1974: *Discovery of the Conservation of Energy*. London: Hutchinson.

Faraday, M.: 1832, 'Experimental Researches in Electricity', *Philosophical Transactions*

of the Royal Society of London, 125-162.

Feynman, R.: 1966 *The Feynman Lectures on Physics*. 2nd edn. London.

Fullinwider, S. P. 1990: 'Hermann von Helmholtz: The problem of Kantian influence', *Studies in History and Philosophy of Science* **21**: 41-55.

Guedj, M.: 2000, *L'émergence du principe de conservation de l'énergie et la construction de la thermodynamique*. PhD Dissertation, Paris.

Heimann, H. 1974: 'Helmholtz and Kant: the metaphysical foundations of Ueber die Erhaltung der Kraft', *Studies in History and Philosophy of Science* **5**, 205-238.

Hertz, H.: 1894, *Die Prinzipien der Mechanik*. J. A. Barth, Leipzig.

Joule, J. P.: 1884, 1887, *The Scientific Papers of James Prescott Joule*. 2 vol. The Physical Society, London. (Rep. Dawsons, London, 1963.)

Keller, F. J.; Gettys, W. E.; Skove, M. J.: 1993 *Physics: classical and modern*. 2nd edn. McGraw-Hill, New York.

Lodge, O. J.: 1879, 'An attempt at a systematic classification of the various forms of energy', *Philosophical Magazine* **8**, 277-286.

Lodge, O. J.: 1885, 'On the identity of energy: in connection with Mr Poynting's paper on the transfer of energy in an electromagnetic field; and the two fundamental forms of energy', *Philosophical Magazine* **19**, 482-494.

Maxwell, J.: 1873, *Theory of Heat*. 3rd ed.. Greenwood, Connecticut.

Mayer, J. R.: 1842, 'Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur', *Annalen der Chemie und Pharmacie* **42**, 233-240. (In Mayer, 1978)

Mayer, J. R.: 1978, *Die Mechanik der Wärme: Sämtliche Schriften*. H. P. Münzenmayer & Stadtarchiv Heilbronn (eds.). Stadtarchiv Heilbronn, Heilbronn.

Ostwald, W.: 1908, *Die Energie*. 2nd edn. J. A. Barth, Leipzig, 1912.

Planck, M.: 1887, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. 4th edn (1921) Teubner, Leipzig, Berlin.

Poynting, J. H.: 1884, 'On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field', *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 343-361.

Preston, T.: 1919, *The Theory of Heat*. 3rd ed. R. Cotter (ed.). Macmillan, London.

Prideaux, N.: 1995, 'Different Approaches to the Teaching of the Energy Concept', *School Science Review* **77**, 49-57.

Rankine, W.: 1850, 'Abstract of a Paper on the Hypothesis of Molecular Vortices, and its Application to the Mechanical Theory of Heat', *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* **II**, 275-288.

Rankine, W.: 1853, 'On the general Law of the Transformation of Energy', *Philosophical Magazine* **34**, 106-117.

Rumford, B. C.: 1798, 'An inquiry concerning the Source of the Heat which is excited by Friction' *Philosophical Transactions*, 80-102.

Schirra, N.: 1989, *Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzepts*. PhD Dissertation, Giessen.

Smith, C.: 1998, *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. The Athlone Press, London.

Thomson, W.: 1851, 'On the Dynamical Theory of Heat; with numerical results deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam', *Transactions of the R. S. of Edinburgh* (1853) **20**, 261-98; 475-482.

Thomson, W.: 1852, 'On a universal tendency in Nature to the dissipation of Mechanical Energy', *Proc. R. S. of Edinburgh* **3**, 139-142.

Thomson, W.: 1854 'On the mechanical antecedents of motion, heat, and light'. In: Thomson, 1884, p. 34-40.

Thomson, W. & Tait, P.: 1862, 'Energy', *Good Words* **3**, 601-607.

Thomson, W.: 1884, *Mathematical and Physical Papers II*. Cambridge University Press, Cambridge.

Watts, D. M.: 1983, 'Some Alternative Views of Energy', *Physical Education* **18**, 213-217.

Young, H. & Freedman, R.: 2004, *Sears and Zemansky's University Physics*. 11th edn. P. Addison-Wesley, San Francisco [etc.].