

**A história da evolução do conceito físico de energia como subsídio para o seu ensino e aprendizagem – parte I<sup>+</sup>**

---

*Luciano Carvalhais Gomes<sup>1</sup>*

Departamento de Física – UEM

Maringá – PR

**Resumo**

*Este artigo tem como objetivo mostrar os aspectos essenciais do desenvolvimento do conceito físico de energia, para subsidiar a escolha dos professores quanto à melhor maneira de compreender e ensinar esse conceito. Estudaremos o pensamento de alguns dos principais cientistas que se interessaram sobre este tema e os debates criados. O artigo está dividido em duas partes. Nesta primeira parte, analisaremos algumas contribuições de Thomas Young, Johann Bernoulli, Galileu Galilei, René Descartes e Leibniz. Além disso, mostraremos como se deu a evolução do conceito físico de energia no contexto das máquinas e para além da mecânica. A ideia principal que norteia a discussão do texto é o fato do desenvolvimento do conceito físico de energia estar intimamente relacionado com o desenvolvimento do princípio de que há uma “constância no meio de mudança”. Ou seja, algo sempre fica constante apesar das mudanças do meio.*

**Palavras-chave:** Física; Energia; Constância e mudança.

**Abstract**

*This paper aims to show the essential aspects of the development of the physical concept of energy, in order to subsidize the choice of teachers about the best way to understand and teach this concept. We will study the thought of some of the main scientists who were interested on the subject, and the emerging debates around this topic. The paper is divided*

---

<sup>+</sup> The history of the evolution of the physical energy concept as support for teaching and learning - part I

\* Recebido: setembro de 2014.  
Aceito: março de 2015.

<sup>1</sup> E-mail: carvalhaisgomes@yahoo.com.br

*in two parts. Firstly, some contributions of Thomas Young, Johann Bernoulli, Galileo Galilei, René Descartes and Leibniz will be analyzed. Moreover, the evolution of the physical concept of energy in the context of machines and beyond the mechanics will be presented. The main idea that guides the discussion of this text is the fact that the development of the physical concept of energy is closely related to the development of the principle that there is a “constancy in the midst of change”. That is, something is always constant despite changes in the environment.*

**Keywords:** *Physics; Energy; Constancy and change.*

## **I. Introdução**

Na área de ensino das ciências, há muitas discussões sobre as dificuldades de ensino e aprendizagem do conceito físico de energia (BEYNON, 1990; DRIVER, 1986; DUIT, 1981, 1987; SEXL, 1981; SOLOMON, 1983, 1992; TEIXEIRA; ASSIS, 2003; VALENTE, 1993, 1999; WARREN, 1982, 1986). Entre as várias propostas presentes na literatura de ensino de ciências, há desde quem defenda iniciar a explicação do conceito de energia como uma espécie de substância “quase-material” que participa em todos os processos que ocorrem ao nosso redor (DUIT, 1987), até aqueles que sugerem explicar que energia é simplesmente a capacidade de um sistema para realizar trabalho (WARREN, 1982).

O objetivo deste artigo é contribuir para minimizar as dificuldades apontadas por essas pesquisas apresentando um resumo histórico do desenvolvimento do conceito físico de energia, para subsidiar a escolha dos professores quanto à melhor maneira de compreender e ensinar esse conceito. A necessidade da compreensão histórica do desenvolvimento científico de um conceito por parte dos docentes é quase que unanimidade entre os pesquisadores da área. De acordo com Carvalho, essa compreensão:

*[...] se torna importante para o planejamento do ensino, apresentando-se como uma forma de associar os conhecimentos científicos com os problemas que originaram sua construção, pois como assinala Bachelard (1938) “todo conhecimento é a resposta a uma questão”. É por meio da História das Ciências que vamos conhecer quais foram as questões, as perguntas, as dificuldades, os obstáculos epistemológicos que os cientistas tiveram de superar ao construírem os conhecimentos que queremos ensinar em sala de aula (CARVALHO, 1992. p. 13).*

No entanto, a caminhada pelo universo histórico da ciência dever ser feita com muito cuidado, evitando-se os principais obstáculos que dificultam a utilização apropriada da história da ciência por parte dos professores. Segundo Martins (2006), uma dessas barreiras é a escassez de material didático adequado.

[...] Não é que não existam livros em português sobre história das ciências – existem muitos, podem ser encontrados em livrarias e até em bancas de jornais. De tempos em tempos alguma editora lança uma coleção de biografias de “gênios da ciência”, e há muitos livros populares a respeito de história das ciências. As enciclopédias e até os livros didáticos trazem também muitas informações. E na Internet é possível também encontrar muito material sobre história das ciências. Então, o que está faltando? Ou já existe material suficiente para ser utilizado na educação?

*O problema não é a quantidade, é a qualidade* [...] (MARTINS, 2006, p. XXVIII, grifo nosso).

Percebemos na prática essa dificuldade apresentada pelo autor ao buscarmos, para a nossa tese de doutorado, textos que discorressem sobre a evolução do conceito físico de energia. Mas conseguimos, depois de muita leitura, fazer uma seleção e resumo dos principais textos que abordaram esse tema, a nosso ver, com qualidade. Este artigo é fruto do que encontramos em nossa pesquisa.

Por questão de espaço disponível no periódico, dividimos a apresentação do artigo em duas partes. Nesta primeira, analisamos algumas contribuições de Thomas Young (1773-1829), Johann Bernoulli (1667-1748), Galileu Galilei (1564-1642), René Descartes (1596-1650) e Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). Além disso, mostraremos como se deu a evolução do conceito físico de energia no contexto das máquinas e para além da mecânica. Na segunda e última parte, encerraremos a nossa análise apresentando algumas contribuições decisivas de James Prescott Joule (1818-1889) e William Thomson (1824-1907) – conhecido como Lorde Kelvin – para a formulação correta e moderna do princípio de conservação de energia e, conseqüentemente, do conceito físico de energia. Após a apresentação desta visão geral, daremos a nossa sugestão de como abordar esse conceito em sala de aula.

## **II. Uma tarefa nada fácil**

Escrever sobre a história da evolução de qualquer conceito científico é uma tarefa árdua. O primeiro obstáculo é a escolha das fontes. Em quais devemos confiar? As fontes primárias são uma unanimidade, no entanto, o trabalho torna-se hercúleo, quiçá impossível, quando o assunto abordado não é exclusivo deste ou daquele pensador e tem-se a pretensão de esgotá-lo ao longo do espaço e do tempo. Quem, porventura, se aventurar nessa empreitada, tem que preencher certos requisitos, dos quais um é ser poliglota e ter um bom conhecimento do conteúdo que está sendo estudado. Outro é despender muitos anos – até mesmo décadas – de leitura. Se a opção for por fontes secundárias, os problemas não são menores. O principal é que quem escreve faz recortes, interpreta e emite a sua opinião sobre os fatos. Não há uma escrita neutra. Diante desse panorama, surge uma pergunta: “[...] quem deveria poder escrever sobre história da física?” (MARTINS, 2001, p. 113). A pergunta está na condicional de propósito, afinal:

*[...] qualquer pessoa pode escrever sobre história da física. Da mesma forma, qualquer pessoa pode escrever sobre cosmologia relativística, sobre física nuclear ou sobre mecânica quântica - não existe nenhum impedimento legal sobre isso. Assim, se um psicólogo, um jornalista ou um sociólogo resolverem publicar livros sobre a teoria da relatividade, ninguém poderá impedi-los. A obra poderá estar repleta de erros, o autor pode mostrar uma total ignorância sobre o assunto, o trabalho poderá levar conceitos incorretos a muitos leitores - mas isso não pode ser impedido, em nossa sociedade (MARTINS, 2001, p. 113).*

Martins (2001) refere-se à divulgação de conceitos científicos por não especialistas, como se esses estivessem a falar em nome dos cientistas e não da classe a qual pertencem. Parece óbvio que o mais habilitado a explicar, qualitativa e quantitativamente, em nome da física, o que essa ciência entende sobre a mecânica quântica, seja um físico que tenha se dedicado anos a fio ao estudo desse assunto. O mesmo se aplica à história da ciência, “[...] somente uma pessoa com um conhecimento e treino adequado nas técnicas de trabalho de história da ciência deveria poder escrever sobre história da ciência” (MARTINS, 2001, p. 114). A crítica do autor tem um endereço certo, os físicos que acreditam que basta saber física para ser competente em história da física. Quem se aventura a escrever sobre história da ciência, ou do desenvolvimento de algum conceito científico, sem um conhecimento e treino adequado, não reconhecerá muitos tipos de erros em artigos e livros nesta área. Como observa Heisenberg (1971 apud MARTINS, 2001, p. 114): “Um especialista é alguém que conhece alguns dos piores erros que podem ser feitos em seu campo, e sabe como evitá-los”. Exemplificando a sua argumentação, Martins (2001) cita uma passagem de um livro do Marcelo Gleiser – “A dança do universo: dos mitos de criação ao *big-bang*” – em que aparece o seguinte comentário:

*Por mais de 2 mil anos, do século IV a.C. até o século XVII, o pensamento de Aristóteles exerceu profunda influência no mundo ocidental. De fato, podemos até dizer que a história da ciência durante esse período se resume, grosseiramente, em duas partes. Na primeira, encontramos uma série de tentativas semidesesperadas de fazer com que a Natureza e a teologia cristã se adaptassem ao legado aristotélico. Na segunda, que ocupou os últimos cem anos desse longo período, presenciamos o nascimento da ciência moderna, que por fim levou ao total abandono das idéias aristotélicas (GLEISER, 1997 apud MARTINS, 2001, p. 115).*

De acordo com Martins (2001), um físico não especialista em história da ciência não perceberia que esse pequeno excerto está repleto de enganos. Muitos diriam que essa citação está presente em vários outros livros sobre história da ciência. No entanto, como vamos saber se não estão todos copiando uns aos outros e repetindo os mesmos equívocos? Para evidenciar e corrigir os erros propalados no parágrafo anterior, Martins (2001) apresenta e analisa trechos de outros livros sobre esse tema, escritos por autores que são pesquisadores com experi-

ência internacionalmente reconhecida em história da ciência, como Crombie (1983), Grant (1996), Weisheipl (1982) e Debus (1978).

Assim, como não somos especialistas em história da ciência, estamos cientes que cometemos erros em nossa descrição histórica. Contudo, para amenizá-los, fizemos o que um bom historiador da ciência procura fazer: “[...] familiarizar-se tanto com a bibliografia secundária (ou seja, aquilo que outros historiadores da ciência já fizeram antes) como com a bibliografia primária (ou seja, as obras científicas e filosóficas antigas do período estudado)” (MARTINS, 2001, p. 116). Antes, tivemos que delimitar no espaço e no tempo a nossa análise, a saber: mundo ocidental, centralizando a nossa atenção no período que vai de 1600 a 1900, antes e depois da definição física do conceito de energia. As mais importantes fontes secundárias estudadas foram aquelas sugeridas por Martins (1984), sendo que ao longo da leitura dessas obras, foram selecionadas algumas fontes primárias e mais outras fontes secundárias. Não temos a intenção, mesmo dentro do espaço e tempo limitados, de esgotar o assunto. Apenas realçamos o que é mais discutido e comentado pelos pesquisadores.

### III. Origens e primeiros usos da palavra

Etimologicamente, a palavra grega *ενεργεια* (*energeia*) deu origem à sua forma latina *energia*. Porém, esse termo ao ser introduzido por Aristóteles na *Metafísica* assume um significado muito diferente do que o atribuímos atualmente (LINDSAY, 1975; VALENTE, 1993). Na analogia do mármore convertido em estátua pelas mãos do escultor, o escultor joga fora parte da pedra para fazer emergir a forma, isto é, “[...] a matéria é a parte potencial atualizada pela ‘energia’ da forma; sendo matéria e forma inseparáveis, tanto quanto o atual é ele próprio potencial que alcançou complemento” (ELKANA, 1974 apud VALENTE, 1993, p. 16). Percebe-se que desde o seu primeiro uso, na filosofia, a palavra *energia* carece de uma definição precisa, apelando-se para exemplos concretos e analogias na sua clarificação. Não encontramos referências do que veio em seguida, apenas que a “[...] ideia de energia é, depois, difundida e no mundo cristão ela surge associada a Deus, é da ordem da divindade” (VALENTE, 1993, p. 16).

Valente (1993) nos traz trechos da pesquisa realizada por Delon (1988) “[...] que trabalhou a ideia de energia em vários domínios entre 1770 e 1820, portanto, num período anterior à emergência do conceito científico, o que acontecerá a meados do século dezanove” (VALENTE, 1993, p. 17). O que nos possibilita ter uma noção do quadro cultural da época em que surge o conceito científico. Entre as várias passagens interessantes citadas, uma das que nos chamou mais atenção foi que de acordo com Delon “[...] a ideia de energia vem interferir com os domínios estético, filosófico e moral, substituindo o velho ideal do equilíbrio pelo ideal do dinamismo” (VALENTE, 1993, p. 22). Ou seja:

*A energia permite uma nova visão do universo, encarando-o como um todo, como um dever. “As palavras, as coisas e os seres não existem se não em relação, em ten-*

*são e em mutação. A língua e a literatura, a natureza, a vida humana são concebidas como outros tantos processos de transformação” [...]. A ideia de transformação começa, assim, a aparecer associada à energia (VALENTE, 1993, p. 22).*

Acreditamos que, desde o seu emprego na filosofia aristotélica, a ideia de transformação já estava associada à energia. Implícita à transformação estavam as ideias de atividade e movimento. Essas ideias aparecem em alguns filósofos materialistas e espiritualistas do século XVIII (Delon, 1988; Valente, 1993). Ao contrário de Descartes, que considera o movimento proveniente de Deus, os materialistas consideram o movimento como um atributo da matéria, que possui sua própria energia. A energia está presente em todos os acontecimentos do universo, em diferentes manifestações. “Para os materialistas este ‘movimento’, esta energia, de todo o universo deriva da interação, através de trocas de energia entre os corpos constituintes do universo” (VALENTE, 1993, p. 24). Os filósofos espiritualistas também creem que o dinamismo do universo é explicado por meio de fluxos e transformações de energia. Todavia, para estes, há, no universo, uma energia, que está além da matéria, que anima toda a natureza e os seres (VALENTE, 1993).

Tradicionalmente, atribui-se a Thomas Young, em 1807, a primeira associação da palavra energia, na terminologia científica, a uma equação. Encontramos essa informação em Rankine (1881), Tait (1864), Elkana (1974), Harman (1982), Solomon (1992), Coelho (2007), Muller (2007), Wilson (1968), Valente (1993, 1999), e outros. Contudo, Lindsay (1975, p. 111) nos prova o contrário ao mostrar que a primeira associação da palavra energia a uma equação, para explicar um fenômeno físico, aparece em uma carta escrita por Johann Bernoulli para Pierre Varignon (1654-1722), em 1717. Ao enunciar e aplicar claramente, também de modo pioneiro, o princípio das velocidades virtuais – atualmente conhecido como princípio dos trabalhos virtuais – no equilíbrio de forças, ele introduz o termo *Energie* para se referir ao produto da força pela sua velocidade virtual – deslocamento virtual, nos dias de hoje –, o que será mais tarde chamado de *travail virtuel* na França. Varignon incluiu o conteúdo dessa carta em seu livro, *Nouvelle Mécanique ou Statique, dont le projet fut donne*, publicado postumamente em 1725. Vejamos o trecho em que a palavra é mencionada:

*[...] Tome, portanto, PC perpendicular à fp e você terá Cp para a velocidade virtual da força F, assim, FxCp é o que chamo de Energia. Note-se que Cp é positivo ou negativo em relação aos outros: é positivo, se o ponto P é empurrado pela força F e o ângulo FPP seja obtuso; é negativo, se o ângulo FPP é agudo; mas, ao contrário, se o ponto P é puxado, Cp será negativo, quando o ângulo FPP é obtuso; e positivo, quando ele é agudo [...] (BERNOULLI, 1717 apud VARIGNON, 1725, p. 175-176, tradução nossa, grifo nosso).*

O texto referido de Young de 1807 está em *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*, uma coletânea de suas conferências proferidas na *Royal Institution* em 1802-1803. Tivemos acesso a uma edição, em dois volumes, de 1845, dessa obra. A

primeira referência da palavra energia ocorre no volume 1, na lição V. Transcrevemos aqui uma parte do texto:

*[...] Daqui é derivada a idéia transmitida pelo termo força viva ou ascendente; uma vez que a altura que um corpo subirá perpendicularmente está relacionada com o quadrado de sua velocidade, ele irá preservar a tendência de subir a uma altura relacionada com o quadrado de sua velocidade, seja qual for o caminho para o qual é dirigido, desde que ele não se choque em um ângulo abrupto ou retorne em uma nova direção, sem perder qualquer velocidade. A mesma ideia é um pouco mais concisamente expressa pelo termo energia, que indica a tendência de um corpo para subir ou para penetrar certa distância, em oposição a uma força retardadora (YOUNG, 1845, p. 34, tradução nossa, grifo nosso).*

Young prefere utilizar o termo energia em vez de *força viva*, expressão cunhada por Leibniz para o produto “ $mv^2$ ” (*vis viva*). De acordo com Lindsay (1975), a verdadeira prioridade que deve ser atribuída à Young é nomear de energia o que conhecemos atualmente, a menos do fator  $\frac{1}{2}$ , por energia cinética. Após a visão geral apresentada por Delon (1988), fica evidente que “[...] a palavra energia estava na moda na altura em que Young [e Bernoulli] a tomou, e o significado implícito de atividade não terá sido estranho à escolha de Young para designar uma grandeza Física, até aí denominada de ‘força viva’, exibindo, portanto, uma carga antropomórfica que não satisfazia Young” (VALENTE, 1999, p. 112). Ainda de acordo com Valente (1999, p. 112):

*[...] O conhecimento didático tem de dar importância a origem da palavra se queremos uma didática não autoritária. É na sua origem que se jogam as influências dos contextos. Os cientistas vivem dentro de uma cultura e não são imunes a ela. Eles pensam com as palavras disponíveis e há uma razão para que a palavra ganhe importância no contexto científico [...].*

Porém, não é ainda aqui que o conceito físico de energia surge na sua completa generalidade. Isso só acontecerá com o enunciado do princípio de conservação da energia (MARTINS, 1984; VALENTE, 1993; LINDSAY, 1975; ELKANA, 1970; HIEBERT, 1962).

#### **IV. Constância no meio de mudança**

De acordo com Schenberg (1985, p. 21):

*[...] se formos procurar a origem de muitas idéias fundamentais da física, veremos que essa origem relaciona-se freqüentemente com práticas que a ciência ocidental tendeu a considerar como supersticiosas. Mas um fato curioso é que não sabemos exatamente de onde vêm as idéias fundamentais, mesmo as que já estão consagradas na física.*

A história do desenvolvimento do princípio de conservação da energia é um bom exemplo para essa afirmação de Schenberg. É muito difícil determinar, dentro e fora do meio científico, a gênese exata desse princípio. Para Lindsay (1975, p. 05), a ideia que está por trás é de que há uma “constância no meio de mudança”. Ou seja, estamos cercados por coisas e acontecimentos que estão a todo o momento mudando. Nós poderíamos descrever como cada uma dessas mudanças ocorre separadamente, sem qualquer relação entre as experiências. Mas, ao longo do tempo, algumas pessoas perceberam que se procurassem por algo que ficasse constante no meio das mudanças observadas, poderiam entender melhor o que estava acontecendo. Provavelmente, isso reflete o desejo de associar ordem com aquilo que parece ser caótico (LINDSAY, 1975, p. 06).

Seguindo com o raciocínio de Lindsay (1975), o uso das primeiras máquinas simples – alavanca, plano inclinado, roda e polia – contribuiu para a germinação dessa tomada de consciência de que algo deve se conservar nos fenômenos, pois a vantagem mecânica fornecida por elas é sempre acompanhada por uma compensação. Por exemplo, quando se utiliza um sistema de polias para subir um objeto, aplica-se uma força menor do que o seu peso. Entretanto, a velocidade com que a corda é puxada é maior do que com a qual o objeto é alçado, o mesmo acontece com o comprimento de corda utilizado no processo. Segundo Lindsay (1975, p. 15), esse fato foi reconhecido explicitamente nos trabalhos sobre mecânica de Heron de Alexandria (10 d.c-70 d.c) – depois por muitos outros – e contém em si a raiz do conceito de energia e de sua conservação.

O aperfeiçoamento das máquinas simples trouxe consigo o desejo de se obter um *moto-perpétuo*. Isto é, “[...] máquinas cujo movimento é auto-alimentado sem necessidade de um agente externo” (CUSTÓDIO; PIETROCOLA, 2004, p. 390). Quem estudou bastante a relação entre o *moto-perpétuo* e as raízes do princípio de conservação da energia foi Ernst Mach (1838-1916) no livro *History and roots of the principle of the conservation of energy*, e no artigo *On the conservation of energy*. Nesses textos, Mach defende o seu ponto de vista de que muitos cientistas, como Simon Stevin (1548-1620) e Christiaan Huygens (1629-1695), concluíram pela impossibilidade da existência de um *moto-perpétuo* por uma necessidade lógica desenvolvida com a experiência. Para Mach (1911, 1986), o teorema de exclusão do movimento perpétuo é uma forma especial da lei da causalidade. Em outras palavras, por meio da capacidade lógica de encontrar conexões entre os acontecimentos que se revelam pelas experiências, em verificar que um fenômeno sempre depende de outro, chegou-se à conclusão da impossibilidade de haver um *moto-perpétuo* e, conseqüentemente, ao princípio de conservação da energia. Mas não podemos nos esquecer que entre o reconhecimento da impossibilidade do movimento perpétuo e a formulação científica da conservação da energia vai uma grande distância.

Lindsay (1975) apresenta alguns exemplos de Galileu Galilei, René Descartes e Leibniz que reforçam o argumento de que, ao longo da história da ciência, certas pessoas perceberam – ou até mesmo intuíram – que algo fica constante no meio de algumas mudanças.



Vamos analisar não só os exemplos citados pelo autor, como outros, para mostrar por que estamos de acordo com essa afirmação.

## V. Algumas contribuições de Galileu

No caso de Galileu, é importante realçar a oposição feita à ideia dos aristotélicos de cessada causa, cessa o movimento. Principalmente, em seu penúltimo trabalho, publicado em 1632, *Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano*, em que o autor apresenta vários exemplos para apoiar os seus argumentos. A preocupação de Galileu é demonstrar que o *impetus* fornecido a um corpo por uma força, fica constante ao longo de seu movimento, a menos que ele sofra algum tipo de resistência. Daí ele conclui que, em condições ideais, uma bola solta de certa altura de um plano inclinado atingirá a mesma altura em outro plano inclinado colocado em sua frente. Pois, como a altura é idêntica, o mesmo *impetus* adquirido na descida é perdido na subida. Logo após, ele continua:

[...]

*(Salviati:)* Até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas sobre o plano ascendente é necessário força para fazê-lo avançar e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais, que em um e em outro caso nasce uma diferença, dependendo se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclive o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se a uma distância maior quanto menor seja a elevação. Dizei-me agora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclive nem em declive.

*(Simplicio:)* [...] parece-me, portanto, que ele deveria ficar naturalmente em repouso [...]

*(Salviati:)* Assim acredito, quando alguém colocasse parado, mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?

*(Simplicio:)* Continuaría a mover-se em direção daquela parte.

*(Salviati:)* Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?

*(Simplicio:)* Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.

*(Salviati:)* Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?

*(Simplicio:) Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida, nem descida.*

*(Salviati:) Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja, perpétuo?*

*(Simplicio:) Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura.*

*(Salviati:) Isso já foi suposto, quando se disse que se removiam todos os impedimentos acidentais e externos, e a fragilidade do móvel, nesse caso, é um dos impedimentos acidentais. Dizei-me então: qual estimais que seja a razão do movimento espontâneo daquela bola pelo plano em declive, e do movimento que se faz sem violência pelo plano em aclave?*

*(Simplicio:) Porque a tendência dos corpos pesados é a de mover-se para o centro da Terra, e, somente por violência, para cima em direção à circunferência; e a superfície inclinada é aquela que se aproxima do centro, enquanto o aclave afasta-se dele.*

*(Salviati:) Portanto, uma superfície que não fosse nem declive nem aclave deveria necessariamente ser, em todas as suas partes, igualmente afastada do centro. Mas existe alguma superfície assim no mundo?*

*(Simplicio:) Não faltam: existe aquela de nosso globo terrestre, se ela fosse, porém, polida, e não como é, áspera e montanhosa; mas existe aquela da água, quando está calma e tranquila (GALILEI, 2001, p. 226-228).*

Apesar de tentar se libertar das concepções de Aristóteles<sup>2</sup> sobre o movimento dos corpos, Galileu ainda não possuía uma teoria de gravitação consistente. Desse modo, acreditava que os corpos ou tinham a tendência de permanecer em repouso ou em movimento circular uniforme. Ele não concebia um movimento retilíneo uniforme perpétuo, pois afirmava que um corpo não pode simplesmente “afastar-se de um lugar”, mas apenas mover-se “em direção a um lugar”. Assim, não há como mover-se em direção a um lugar onde é impossível chegar (COHEN, 1988, p. 155). Caso um móvel estivesse em uma horizontal, afastando-se do centro da Terra pela tangente a essa em algum ponto A, conforme representado na Fig. 1, aos poucos sua velocidade diminuiria. Em B, por exemplo, por estar mais afastado do centro da Terra do que em A, o corpo teria a “inclinação” a descer de B para A (LUCIE, 1977, p. 131-132).

---

<sup>2</sup> Para Aristóteles, os corpos que habitam o mundo supralunar possuem movimentos circulares e uniformes. Já o movimento dos corpos que se encontram no mundo sublunar relacionam-se com a natureza de seus materiais, sendo de dois tipos: o movimento natural e o movimento forçado ou violento. Os naturais fazem-se de acordo com a natureza dos corpos, vertical para baixo no caso dos corpos pesados e verticais para cima caso o corpo seja leve. Assim, os quatro elementos que compõem o mundo sublunar movem-se de acordo com seu peso ou leveza sempre em linha reta. Os violentos ocorrem por violação a esta tendência natural de movimento, sendo produzidos por forças em contato com o corpo. Portanto, cessada a força, cessa o movimento.

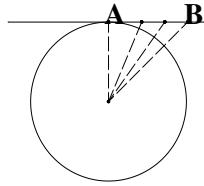


Fig. 1 – Sobre um plano horizontal, um grave não permaneceria “indiferente” ao movimento ou ao repouso. Com efeito, em B ele está mais afastado do centro da Terra que em A. Ele teria, portanto, “inclinação” a descer de B para A.

Fonte: Adaptado de LUCIE (1977, p. 133)

De outra maneira, continuando com o raciocínio de Galileu, ao darmos um pequeno impulso a uma bola perfeitamente redonda, polida e rígida, sem impedimentos acidentais ou externos, sobre uma superfície livre de quaisquer irregularidades, centrada na Terra e rígida, essa continuaria perpetuamente em movimento circular uniforme, pois não se afasta e nem se aproxima do centro. É o que acontece com o navio que se move por um mar calmo e também com a pedra que está no alto do mastro. Ao ser solta, a pedra acompanha o movimento circular uniforme do navio enquanto cai. Sendo que estes dois movimentos não podem ser considerados contrários. Contrários seriam os movimentos de afastamento e aproximação do centro, o que não ocorre aqui. Como nós nos movimentamos circularmente junto com a pedra, não percebemos esse movimento e a enxergamos em queda retilínea, indo de encontro à base do mastro do navio.

O que nos interessa disso tudo é que, mesmo com outros objetivos em mente, Galileu está boa parte do tempo utilizando, intuitivamente, a conservação da energia mecânica em suas considerações. Esse tipo de raciocínio aparece também em seu último livro, *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenenti alla mecanica i movimenti locali*, conhecida como os *Discorsi*, publicado em 1638<sup>3</sup>. A certa altura, após definir o movimento uniformemente acelerado como aquele que, partindo do repouso, adquire em tempos iguais velocidades iguais, Galileu, por meio de Salviati, faz a seguinte declaração: “As velocidades adquiridas por um mesmo corpo se movendo para baixo em planos de diferentes inclinações são iguais quando as alturas desses planos são iguais” (GALILEI, 1914, p. 169, tradução nossa).

Em seguida, com o auxílio da Fig. 2, Galileu esclarece melhor o que foi enunciado. Considerando o lado CB, perpendicular ao lado AB, como a altura do plano inclinado. Desprezando-se quaisquer resistências, como asperezas do móvel e do plano, o físico italiano afirma, categoricamente, que uma bola pesada e perfeitamente redonda descendo ao longo das linhas CA, CD e CB alcançaria os pontos A, D e B com ímpetos iguais.

<sup>3</sup> Utilizamos a obra publicada em 1914, traduzida para o inglês por Henry Crew e Alfonso de Salvio, da Universidade de Northwestern, com a introdução de Antonio Favaro, da Universidade de Pádua.

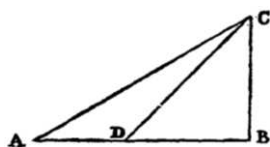


Fig. 2 – Desenho utilizado por Galileu para explicar que a velocidade alcançada por um mesmo móvel, ao cair por um plano inclinado, depende somente da altura em que é solto. Fonte: GALILEI (1914, p. 170).

Para comprovar, Galileu descreve o seguinte experimento. Ele fixou em um prego no ponto A – ver Fig. 3 – um fio fino AB com uma bola de chumbo suspensa em sua extremidade. Ao deslocá-la até o ponto C e soltá-la, a bola alcançou quase a paralela CD, que é perpendicular a AB, não chegando a tocá-la por um pequeno intervalo, o que é causado pela resistência do ar e do fio. Disso, Galilei (1914, p. 170, tradução nossa) concluiu que “[...] a bola, em sua descida ao longo do arco CB, adquiriu um momento [ímpeto] ao chegar em B, que foi suficiente para levá-la pelo semelhante arco BD à mesma altura”.

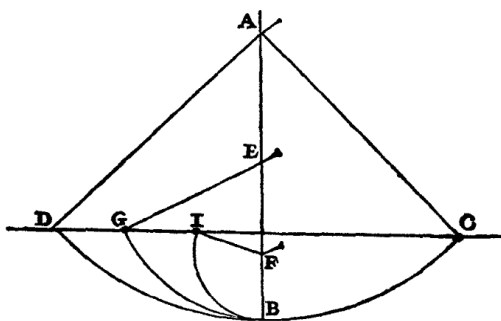


Fig. 3 – Desenho utilizado por Galileu para explicar que o ímpeto adquirido pela bola no ponto B, ao percorrer o arco CB, foi suficiente para elevá-la, segundo um arco similar BD, à mesma altura até o ponto D. Fonte: GALILEI (1914, p. 171).

Depois Galileu conta que tornou deixar a bola cair do ponto C, agora fixando outro prego no ponto E, novamente ela atingiu a mesma altura da reta CD, no ponto G. Exatamente igual aconteceu quando fixou um prego no ponto F e a bola alcançou o ponto I. A explicação disso é que:

[...] uma vez que os dois arcos CB e DB são iguais e semelhantemente dispostos, o momento [momento] adquirido pela queda ao longo do CB é o mesmo que o obtido pela queda ao longo do arco DB, mas o momento [momento] adquirido em B, devido à queda ao longo de CB, é capaz de levantar o mesmo corpo [mobile] ao longo do arco BD, portanto, o momento adqui-

*rido na queda BD é igual ao que levanta o mesmo corpo ao longo do mesmo arco de B para D, assim, em geral, cada momento adquirido pela queda ao longo de um arco é igual ao que se pode levantar o mesmo corpo ao longo do mesmo arco. Mas todos esses momentos [momenti] que causam as subidas ao longo dos arcos BD, BG e BI são iguais, uma vez que são produzidos pelo mesmo momento ganho pela queda ao longo de CB, como mostra a experiência. Portanto, todos os momentos ganhos pelas quedas ao longo dos arcos DB, GB, IB são iguais (GALILEI, 1914, p. 171-172, tradução nossa).*

Fica evidente, por meio desses exemplos, que Galileu tinha a noção intuitiva de que um corpo retorna ao seu estado de movimento original, após passar por um jogo de compensações ao longo de sua trajetória, o que confirma mais uma vez a hipótese de Lindsay (1975).

## **VI. Algumas contribuições de Descartes**

Outro importante passo em direção ao princípio de conservação da energia foi dado por Descartes. Ele afirmava que o movimento teria duas causas distintas: a causa primária e universal, que produz geralmente todos os movimentos que existem no mundo, e as causas secundárias e particulares, que fazem com que cada parte da matéria adquira o movimento que antes não possuía. A causa primeira não seria outra senão “[...] Deus, cuja onipotência deu origem à matéria com o seu movimento e o repouso das suas partes, conservando agora no universo, pelo seu concurso ordinário, tanto movimento e repouso como quando o criou[...]” (DESCARTES, 1997, p. 75). A respeito das causas secundárias, Descartes (1997, p. 76) assim se expressa:

*Como Deus não está sujeito a mudanças, agindo sempre da mesma maneira, podemos chegar ao conhecimento de certas regras a que chamo as leis da Natureza, e que são as causas segundas, particulares, dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos [e daí a importância dessas leis].*

Em outras palavras, desde o momento da Criação, a quantidade de movimento total do Universo se conserva, seguindo certas leis criadas por Deus. Essas leis são as seguintes:

*[Primeira Lei:] [...] cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. Por conseguinte, se vemos que uma parte da matéria é quadrada, ela permanecerá assim se nada vier alterar a sua figura; e se estiver em repouso, nunca se moverá por si mesma; mas, uma vez posta em andamento, também não podemos pensar que ela possa deixar de se mover com a mesma força enquanto não encontrar nada que atrase ou detenha o seu movimento. De modo que, se um corpo começou a mover-se, devemos concluir que continuará*

*sempre em movimento [e que nunca parará por si próprio]* (DESCARTES, 1997, p. 76).

[Segunda Lei:] *que cada parte da matéria, considerada em si mesma, nunca tende a continuar o seu movimento em linha curva mas sim em linha recta, embora muitas destas partes sejam muitas vezes obrigadas a desviar-se porque encontram outras no caminho, e quando um corpo se move toda a matéria é conjuntamente movida e faz sempre um círculo [ou anel]. Esta regra, tal como a precedente, depende de facto de Deus ser imutável e de conservar o movimento na matéria [...]* (DESCARTES, 1997, p. 77).

[Terceira Lei:] *que se um corpo em movimento não encontrar outro, tem menos força para continuar a mover-se em linha recta do que este para lhe resistir, perdendo a determinação e desviando-se mas sem nada perder do seu movimento; e se tiver mais força move consigo esse outro corpo e perde tanto movimento como aquele que lhe transmite [...]* (DESCARTES, 1997, p. 78).

As duas primeiras leis juntas podem ser consideradas como o “princípio de inércia” de Descartes. Que avançou em relação ao “princípio de inércia” de Galileu ao afirmar que a matéria tende a se movimentar em linha reta, mas ainda está distante ao de Newton, por ainda não relacionar força com a mudança do movimento. Gabbey (1989 apud Gaukroger, 1999, p. 305-306, grifo nosso) resume o significado da palavra “força” na época de Descartes:

*Tomando a dinâmica do século XVII como um todo, na medida em que isso é permissível, pode-se dizer que a grande maioria de seus praticantes entendia a força, em seu sentido funcional, como o estado concomitante de um corpo – expresso em termos de toda a sua velocidade e massa corporal – passível de ser identificado com a capacidade relativa deste corpo de superar uma força de resistência entendida de maneira similar, fosse ela potencial ou real, independentemente da velocidade e da massa corporal em cujos termos se expressasse a força contrária. As interações dos corpos eram vistas como competições entre forças opostas, sendo as maiores as vencedoras e as menores as perdedoras: uma concepção de origem evidentemente antropomórfica.*

Assim, na maioria das vezes que Descartes atribui “força” aos corpos, sobretudo, “força de resistência”, é somente uma “maneira de se expressar”. Isso “[...] não significa atribuir qualquer coisa real aos corpos que estivesse abaixo ou acima do fato que Deus conserva seu movimento e, por conseguinte, eles obedecem a uma lei de conservação do movimento” (GARBER, 1992 apud BARRA, 2003, p. 314). Outras vezes, a palavra “força” é empregada como a medida da quantidade de movimento do corpo – “mv” – e vice-versa.

## VII. Leibniz e a controvérsia da *vis viva*

Advém daqui a polémica entre os seguidores de Descartes e Leibniz, quando esse último demonstrou em um artigo, em 1686, que a força de um corpo não poderia ser encontrada pela sua quantidade de movimento. Em outro artigo, em 1695, ele sugere, explicitamente, que é a *vis viva* –  $mv^2$  – que era conservada no movimento, cabendo a ela ser considerada a verdadeira medida da força. Repare o leitor que no seio dessa controvérsia está novamente a ideia defendida por Lindsay (1975) de que, ao longo da história da ciência, sempre existiram alguns pensadores que tinham uma convicção de que algo fica constante em um meio cheio de mudanças. No caso de Descartes e de Leibniz, essa crença é muito mais metafísica do que empírica, pois ambos “[...] utilizam uma base apriorística para suas propostas [...]” (MARTINS, 1984, p. 68). O que vem confirmar, outra vez, a difícil tarefa de se encontrar uma única gênese – e um único caminho – para o desenvolvimento do conceito de energia. Mas vamos continuar na pista do princípio da conservação da energia analisando um pouco mais a contribuição de Leibniz.

Leibniz (1983)<sup>4</sup> começa o artigo enfatizando que a sua discordância com os cartesianos está na afirmação de que a força pode ser encontrada pela quantidade de movimento –  $mv$  – do corpo. De acordo com o filósofo alemão:

*[...] é muito razoável a mesma força conservar-se sempre no universo. Igualmente se observa com nitidez, quando se presta atenção nos fenômenos, a inexistência do movimento mecânico perpétuo, porque, então, a força dum máquina, sempre um tanto diminuída devido à fricção e em breve terminada, se renovaria e por consequência aumentaria de per si sem qualquer impulso externo. Nota-se também não haver diminuição na força de um corpo, a não ser na medida em que ele a transmite a corpos contíguos ou às próprias partes, se possuem movimento independente. Acreditaram, assim, que podia também dizer-se da quantidade movimento o que pode ser dito da força (LEIBNIZ, 1983, p. 132-133).*

Em resumo, o autor concorda que a força se conserva no universo, mas não que a quantidade de movimento tenha o mesmo comportamento. Então, é incorreto relacionar as duas. Para testar a sua hipótese, Leibniz imagina o seguinte experimento – ver Figura 4. Primeiro ele supõe “[...] que um corpo, caindo dum certa altura, adquire a força de subir até ela de novo, se o leva assim a sua direção, a menos que se encontrem alguns obstáculos” (LEIB-

---

<sup>4</sup> O artigo mencionado de 1686 foi publicado na *Acta Eruditorum*, em Leipzig. Obtivemos acesso a uma versão de língua inglesa que se encontra no livro de Lindsay (1975, p. 119-121). O título deixa bem claro qual era a intenção do autor: *A brief demonstration of the memorable error of Descartes and others concerning the natural law according to which they claim that the same quantity of motion is always conserved by God, a Law that they use incorrectly in mechanical problems* (Uma breve demonstração do erro memorável de Descartes e outros sobre a lei natural, segundo a qual afirmam que a mesma quantidade de movimento é sempre conservada por Deus, uma lei que usam incorretamente em problemas mecânicos). O mesmo texto foi incluído no seu “Discurso de Metafísica”, também de 1686, podendo ser encontrado traduzido para o português na coleção “Os Pensadores”.

NIZ, 1983, p. 133). Ele também imagina “[...] ser necessária tanta força para elevar um corpo A, de uma libra, à altura CD de quatro toesas, quanta para elevar um corpo B, de quatro libras, à altura EF de uma toesa” (LEIBNIZ, 1983, p. 133). Dizendo, na sequência, que essas suposições são aceitas como válidas pelos cartesianos e por outros filósofos e matemáticos de seu tempo. Admitindo isso como verdadeiro, com a queda, os corpos A e B atingirão os pontos D e F, respectivamente, com forças iguais. Vê-se, aqui, o mesmo jogo de compensações adotado por Galileu na análise do pêndulo. O que o italiano denominou de *momentum*, Leibniz chamou de “força”. Evidentemente, com objetivos diferentes.

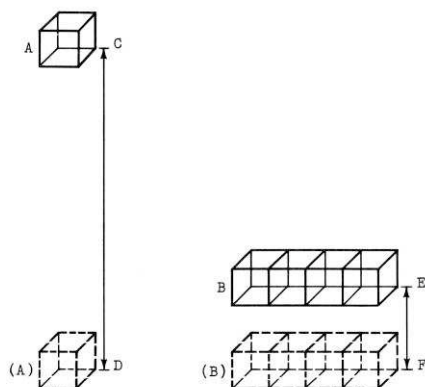


Fig. 4 – Experimento proposto por Leibniz para demonstrar que a quantidade de movimento não serve como a verdadeira medida da força. Fonte: LINDSAY (1975, p. 120)

O arremate de sua argumentação está no cálculo da quantidade de movimento dos dois corpos nos pontos D e F. Para isso, Leibniz utiliza os resultados obtidos por Galileu na análise de corpos em queda livre, em que a velocidade adquirida por um corpo não depende de sua massa e o seu quadrado é diretamente proporcional ao espaço percorrido ao longo da queda. Assim, o corpo A chega ao ponto D com uma velocidade duas vezes superior que o corpo B chega ao ponto F, pois a distância de queda é quatro vezes maior. Mas como a massa do corpo B é quatro vezes maior do que de A, a quantidade de movimento do corpo A será a metade do corpo B.

Logo, ao atingirem os pontos D e F, respectivamente, os corpos A e B terão as mesmas forças, mas quantidades de movimento diferentes. “Há, portanto, grande diferença entre a quantidade de movimento e a força, como se queria demonstrar” (LEIBNIZ, 1983, p. 134). Desse modo, “[...] a força deve ser avaliada pela quantidade do efeito que pode produzir, por exemplo, pela altura a que se pode levantar um corpo pesado de certo tamanho e espécie, o que é muito diferente da velocidade que se lhe pode imprimir. Para lhe dar o dobro da velocidade é necessário mais do dobro da força” (LEIBNIZ, 1983, p. 134). Essa última afirmação de Leibniz confirma o comentário feito por Medeiros (2001, p. 04-05) de que nos séculos XVII e XVIII:



*A conceituação dominante de força estava relacionada ao fato cotidiano de um corpo em movimento ter a capacidade de poder colocar outros corpos em movimento, assim como de vencer resistências. Esta capacidade de um corpo em movimento poder produzir esses efeitos era denominada a sua “força”. A questão imediata era determinar de que grandezas físicas dependeriam esta força e como seria essa dependência. Galileu, por exemplo, utilizava o termo ‘momentum’ afirmando que o ‘momentum’ era aquela força (virtude) que dependia não apenas do peso, mas também da velocidade do movimento (Jammer, 1999, pp. 98-99). Descartes (1644), por seu turno, assumia que a força de um corpo era determinada por aquilo que na mecânica medieval havia sido denominado de “impetus”, ou seja, o produto da massa pela velocidade de um corpo em movimento [...]*

Ao contrário do que muitos afirmam – Medeiros (2001), Oliveira (2006), Coelho (2007), Ponczek (2000), entre outros –, não foi nesse texto que Leibniz introduziu o termo “força viva” (*vis viva*), muito menos afirmou que a medida da força é “ $mv^2$ ”. Pelo menos não de modo explícito. De acordo com Iltis (1971, p. 25, tradução nossa): “[...] Ele não fala publicamente da força viva até 1695 no conhecido *Specimen dynamicum*, embora ele use o termo em seu não publicado *Essay de dynamique* em 1691”. O artigo referido de 1695 foi publicado na *Acta Eruditorum*, em Leipzig. Há trechos dele, em língua inglesa, no livro de Lindsay (1975, p. 122), em que Leibniz define como “força morta” (*vis mortua*) a força que um corpo possui sem estar ainda em movimento, por exemplo, uma pedra esticada em um estilingue esperando para ser lançada. A “força viva” (*vis viva*), ao contrário, está associada com o movimento do corpo. Lindsay (1975, p. 122) nos informa que no final do artigo, após alguns exemplos específicos envolvendo a *vis viva* dos corpos em movimento, Leibniz enfatiza a dependência fundamental da “força viva” com “ $mv^2$ ”. Hiebert (1962, p. 80, tradução nossa) nos esclarece que, em outros dois manuscritos sem data, Leibniz desenvolve sua ideia sobre a conservação da força, em ambos:

*[...] O conceito de vis foi expandido para incluir qualquer força potencial em geral, **potentia** ou force vive **absolue** como ele a chamava. Existe força potencial sempre que um objeto, por causa de sua condição, for capaz de provocar ações ou mudanças que não podem acontecer por elas mesmas, ou seja, ações mostram a medida da força conservada, e não a quantidade de movimento. Assim, não há força (**potentia**) somente em corpos em movimento, mas também em um corpo levantado e em um corpo elástico esticado.*

Nessa passagem, encontra-se o germen do conceito moderno do que é conhecido como energia potencial. Na linguagem atual, podemos dizer que Leibniz está tentando formular uma noção generalizada de formas de energia que não seja a cinética (HIEBERT, 1962, p. 81). É bom lembrar que Christiaan Huygens já havia chegado à relação “ $mv^2$ ” nas suas análises sobre colisões – 1669 – e pêndulo composto – 1673. Inclusive, afirmou que a soma dos produtos de cada massa de um corpo pelo quadrado de sua velocidade é sempre a mesma an-

tes e depois nas colisões de corpos duros – colisões elásticas. E, no caso do pêndulo composto, a soma dos produtos de cada massa dos corpos que o compõem pelo quadrado de suas respectivas velocidades é igual ao produto da soma das massas de todos os corpos multiplicado pelo quadrado da velocidade do centro de gravidade do pêndulo. Entretanto, Huygens não atribuiu nenhum significado especial ao termo “ $mv^2$ ”, não o nomeou, nem o relacionou com a medida da força de um corpo, como fez Leibniz (SMITH, 2006; LINDSAY, 1975; HIEBERT, 1962; ILTIS, 1971).

A controvérsia entre Leibniz e os seguidores de Descartes teve grande repercussão no meio científico da época. Entre aqueles que eram partidários de Leibniz, estavam “[...] John and Daniel Bernoulli, Woff, ’s Gravesande, Hermann, Musschenbroek, the Marquise du Châtelet” (HIEBERT, 1962, p. 100). Do lado dos cartesianos estavam “[...] Newton, Papin, Mairan, Samuel Clarke, Mariotte, Varignon, and Voltaire [...]” (HIEBERT, 1962, p. 100). Um problema que não passou despercebido, por esses e outros pesquisadores, foi o fato de que em uma colisão frontal, em que os dois corpos se unem e param completamente, não há conservação da *vis viva*. Todavia, Hiebert (1962, p. 87) esclarece que:

*Apesar de essas dificuldades, os princípios de conservação não foram, contudo, abandonados, uma vez que sempre se podia argumentar que a destruição do movimento ou vis viva era apenas aparente; enquanto os movimentos macroscópicos dos corpos obviamente diminuía, equivalentes forças ocultas de compensação de algum tipo deveriam existir em outros lugares.*

Ainda de acordo com Hiebert (1962, p. 88), Leibniz tinha uma teoria para explicar essa aparente perda. Ele afirmava que a *vis viva* era transferida para as pequenas partes invisíveis que compunham o corpo, mantendo-as em movimento. Em síntese:

*Para além da “vis viva” representar, para Leibniz, a medida da força, ela era, também, considerada uma quantidade constante no universo. No entanto, nas colisões inelásticas parece haver uma perda de “força”. Leibniz referia-se a estes fenômenos como macroscópicos, afirmando que a perda de força era apenas aparente. Leibniz considera, portanto, que as forças não são destruídas, mas são dispersas por entre as pequenas partes. “Os corpos não perdem as suas forças; mas o caso aqui é o mesmo, como quando os homens trocam uma nota de grande valor monetário em pequenas moedas” (Leibniz, citado por Jammer, p. 168). Esta analogia poderá ser valiosa para a introdução da ideia de dissipação da energia (VALENTE, 1993, p. 43).*

A data usualmente aceita como fim da controvérsia sobre a medida da força é 1743, ano da publicação da primeira edição do *Traité de Dynamique*, obra de Jean le Rond d’Alembert (1717-1783). Porém, Iltis (1970) observa que essa controvérsia perdurou por muitos anos depois dessa data. Além de muitos pesquisadores mostrarem que não pode ser atribu-

ída a d'Alembert a prioridade para a solução desse embate. O principal argumento é que d'Alembert afirma que a *vis viva* é a medida da força atuando ao longo da distância, bem como a quantidade de movimento é a medida da força atuando ao longo do tempo, apenas na segunda edição do *Traité de Dynamique*, em 1758. Contudo, “[...] como Pierre Costabel tem mostrado, esse argumento já havia sido apresentado por Roger Boscovich em 1745” (ILTIS, 1970, p. 135, tradução nossa). Na edição de 1743, d'Alembert diz somente que a controvérsia é uma questão de palavras, mas “[...] como Thomas Hankins apontou, ‘s Gravesande já havia chamado o debate de verbal em 1729” (ILTIS, 1970, p. 135).

É interessante destacar que D'Alembert discordava tanto da visão de Descartes como da visão de Leibniz sobre o conceito de força, como alguma coisa residindo no corpo. Força deveria ser vista somente como a resistência que os obstáculos oferecem ao movimento de um corpo, sendo a sua medida dada pelo “efeito” que ela produz ao superar essas resistências. Desse modo, haveria apenas três tipos de forças: “força morta”, em que o corpo tem o movimento impedido por um obstáculo; “quantidade de movimento”, em que o corpo move uniformemente; e “força viva”, em que o corpo move com uma velocidade que é aniquilada pouco a pouco por uma resistência externa. De acordo com Iltis, D' Alembert:

*[...] No primeiro caso, o efeito é reduzido a uma simples tendência que não é propriamente uma medida uma vez que nenhum movimento é produzido, no segundo, o efeito é o espaço percorrido uniformemente em um determinado tempo e esse efeito é proporcional à velocidade; no terceiro caso, o efeito é o espaço percorrido até a extinção total do movimento e esse efeito está relacionado com o quadrado da velocidade (D'ALEMBERT 1758 apud ILTIS, 1970, p. 138).*

Esse último enunciado de d'Alembert relaciona de modo explícito a força exercida sobre um corpo, durante certo tempo, com a velocidade; e a força exercida sobre um corpo, durante certo espaço percorrido, com o quadrado da velocidade. A primeira relação foi muito estudada por Newton e não é muito importante para os nossos objetivos. Ao contrário da segunda, que junta dois conceitos: trabalho e energia cinética (a menos do fator  $\frac{1}{2}$ ). Ainda não com esses nomes. Conforme vimos até esse momento, do ponto de vista mais intuitivo e qualitativo, as noções de trabalho e energia cinética são muito antigas. A grande contribuição de d'Alembert foi evidenciar a relação que existe entre os dois. Entretanto:

*[...] essa nova concepção dinâmica do conceito de trabalho não foi realmente empregada ou difundida antes de 1819-1839, quando recebeu plena expressão nas obras de Navier, Coriolis, Poncelet e outros. Todos eles se ocupavam da análise de máquinas em movimento. Disso resulta que o trabalho – a integral da força com relação à distância – foi seu parâmetro conceitual fundamental. Entre outros resultados típicos e significativos dessa reformulação estavam a introdução do termo “trabalho” e de unidades para sua mensuração, a redefinição da vis viva como  $\frac{1}{2} mv^2$ , a fim de preservar a*

*prioridade conceitual da medida do trabalho, e a formulação explícita da lei de conservação em termos da igualdade entre o trabalho realizado e a energia cinética gerada [...] (KUHN, 2011, p. 109-110).*

Em sua fala, Kuhn apresenta Navier, Coriolis e Poncelet como os principais atores que deram continuidade à obra de d'Alembert, elencando alguns fatos marcantes. Na época da revolução industrial, em que as máquinas precisavam de uma teoria detalhada que explicasse o seu funcionamento, o conceito físico de trabalho foi aperfeiçoado por engenheiros politécnicos franceses. Oliveira (2006), em sua tese de doutorado, fez uma rica pesquisa sobre esse período procurando entender como se deu a evolução do conceito físico de trabalho no contexto das máquinas. Além de Navier, Coriolis e Poncelet, ele também cita Lazare Carnot como as personalidades que se destacaram nesse estudo. Antes de analisarmos outros cientistas que contribuíram para a formulação mais geral do princípio da conservação da energia – além da mecânica –, apresentaremos um breve resumo do que fizeram esses personagens.

## **VIII. O conceito físico de trabalho no contexto das máquinas**

### **VIII.1 Algumas contribuições de Lazare Carnot**

Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (1753-1823) nasceu em uma família da burguesia na região de Borgonha – França. Devido a uma aptidão precoce para a matemática e as questões técnicas, seguiu a carreira de engenheiro militar.

*Em pleno século XVIII o que era comum para se assegurar a educação de um filho, quando as famílias eram mais abastadas, era apelar-se para um eclesiástico ou um preceptor. Os caminhos a serem seguidos eram basicamente dois. Os estudos clássicos ou de humanidades e o outro eram as escolas militares. Nas universidades estavam reservados os estudos de direito, medicina ou teologia (OLIVEIRA, 2006, p. 140).*

Lazare Carnot entrou para a Escola de Engenharia de Mézières, em 1771, onde foi aluno de d'Alembert. Em 1778, com a finalidade de concorrer a um concurso promovido pela Academia Real de Ciências de Paris, escreveu um ensaio abordando os seguintes temas: experiências sobre o atrito; princípios das máquinas em geral; máquinas simples em equilíbrio e máquinas em movimento. No corolário 13, no final de uma de suas demonstrações, aparece a seguinte expressão:  $2MpH = MV^2$ , em que Mp = peso; H = altura e V = velocidade. Segundo Oliveira (2006, p. 161, grifo nosso):

*Essas são as primeiras equações algébricas na primeira memória de Carnot e que envolvem as quantidades que mais tarde iriam se tornar conhecidas como energia cinética e trabalho e que por enquanto ainda eram denominadas de **força viva** e **momento de atividade** ou **momento de ação**, estas duas últimas as formas como Carnot designava o trabalho. Conforme vimos tam-*

*bém se trata da aplicação do princípio da conservação da força viva, o qual temos nos reportado com bastante freqüência e ao qual retornaremos no capítulo seis quando ele é extensivamente aplicado às máquinas nas primeiras décadas do século XIX.*

Nos demais trabalhos escritos por Lazare Carnot, ele utiliza “[...] em larga medida o princípio da conservação das forças vivas o que equivale a relacioná-las diretamente ao conceito de trabalho, mas também globalmente, ou seja, como um balanço sobre todo o sistema como um princípio mais geral de conservação” (OLIVEIRA, 2006, p. 207). Com base nesses fundamentos, é dele o mérito do desenvolvimento sólido de uma teoria geral das máquinas. Era o que faltava para que qualquer máquina pudesse ser estudada e, conseqüentemente, comparada com outra. Somente assim seria possível aumentar sua eficiência, otimizar seu funcionamento e passar a considerá-la como um fator de produção (OLIVEIRA, 2006).

### **VIII.2 Algumas contribuições de Navier**

Claude Louis-Marie-Henri Navier (1785-1836) foi admitido na Escola Politécnica em 1802, e na Escola de Pontes e Estradas em 1808, ambas na França, seu país natal. Os cursos nas duas escolas de engenharia deram a Navier uma grande habilidade teórico-prática. Do ponto de vista físico, ele não traz nenhuma contribuição relevante ao conceito de trabalho. Sua contribuição maior é recolocar a questão do trabalho como uma preocupação nitidamente econômica. Navier buscava medir:

*[...] a capacidade de trabalho de uma máquina no contexto da produção, independentemente da natureza de seu trabalho para que assim se tenha a disposição uma medida comum e que não passará pelo preço de mercado. Usando as palavras de Navier: Estabelecer uma sorte de moeda mecânica, se podemos exprimir assim, com a qual se possa estimar as quantidades de trabalho empregado para efetuar toda espécie de fabricação (OLIVEIRA, 2006, p. 220).*

Ele considerava que a ciência mecânica podia fornecer a medida comum que estava faltando à análise econômica. Segundo uma visão corrente nesta época, ele acreditava que toda produção consistia em vencer uma resistência mecânica, ou seja, deslocando uma força ou deformando um corpo. Mas o gênero de trabalho mais adequado para servir de avaliação de todos os outros é a elevação vertical dos corpos pesados.

*Com efeito, independentemente de que ele seja suscetível de uma expressão numérica precisa, invariável e isenta de arbitrariedades, podemos sempre, qualquer que seja a natureza do trabalho executado por uma máquina dada, não somente no pensamento e por uma abstração do espírito, mas na realidade, substituir este trabalho pela elevação de um peso... A elevação de pesos representará então o trabalho da máquina e, uma máquina será consi-*

*derada como tendo realizado mais trabalho se ela puder elevar pesos maiores a uma altura maior* (NAVIER, 1819 apud OLIVEIRA, 2006, p. 221).

Sempre tendo em mente uma maneira de medir tanto o produto como os dispêndios nas máquinas, Navier avança em relação a Carnot aprofundando a utilização do conceito de trabalho ao eliminar algumas ambiguidades que existiam entre trabalho útil, perdido e resistente. Além de ser um dos responsáveis pelo processo de incorporação do conceito físico de trabalho ao pensamento econômico (OLIVEIRA, 2006).

### VIII.3 Algumas contribuições de Coriolis

Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843) nasceu em Paris. Entrou para a Escola Politécnica aos dezesseis anos em 1808. Em 1810, entrou como aluno-engenheiro na Escola de Pontes e Estradas. Em 1829, publicou sua obra mais importante *Du calcul de l'effet des machines*. Esse livro causou grande impacto nos meios científicos, devido ao modo como o trabalho mecânico foi abordado. Ainda nas páginas introdutórias, Coriolis esclarece sobre as novas denominações que irá introduzir ao longo do texto:

*[...] Eu empreguei nesta obra algumas denominações novas: eu designo pelo nome de trabalho a quantidade que chamamos muito comumente potência mecânica, quantidade de ação ou efeito dinâmico, e eu proponho o nome de dinamode para a unidade desta quantidade. Eu me permiti uma ligeira inovação ao chamar força viva ao produto do peso pela altura devido à velocidade. Esta força viva não é senão a metade do produto que temos designado até o presente por este nome, isto é a massa pelo quadrado da velocidade* (CORIOLIS, 1829 apud OLIVEIRA, 2006, p. 227).

Segundo Oliveira, alguns autores atribuem impropriamente a Poncelet a utilização e adoção do termo trabalho para o produto da força pelo deslocamento. A seu ver, Coriolis formaliza pela primeira vez o que denominamos hoje de teorema do trabalho e da energia cinética. Falta apenas denominar a metade da “força viva” de energia cinética – veremos mais à frente quem fez isso. Assim, a palavra trabalho vai paulatinamente substituindo as outras denominações anteriores como potência mecânica, quantidade de ação, efeito dinâmico, momento de atividade, entre outras. Coriolis ainda define a “[...] quantidade de trabalho, como a integral da componente tangencial da força multiplicada pelo elemento de arco da trajetória da partícula, trabalho motor e trabalho resistente” (OLIVEIRA, 2006, p. 227-228). Em seguida, enuncia que “[...] Durante um movimento qualquer, a diferença entre o trabalho motor e o trabalho resistente, devido às forças aplicadas ao ponto material, é igual ao crescimento que tem a força viva do móvel durante este tempo” (CORIOLIS, 1829 apud OLIVEIRA, 2006, p. 228). Em síntese, devemos a Coriolis o teorema do trabalho-energia na sua forma moderna.

#### VIII.4 Algumas contribuições de Poncelet

Jean-Victor Poncelet (1788-1867) nasceu na cidade de Metz, na França. Em 1807 entrou para a Escola Politécnica. A principal contribuição de Poncelet aos estudos já realizados por Lazare Carnot, Navier e Coriolis é a consideração do tempo no trabalho realizado. Essa questão sempre esteve presente nas análises de seus antecessores, mas de modo incompleto. Em seu livro *Notice sur l'Introduction à la Mécanique Industrielle et sur le Cours de Mécanique Appliquée aux Machines* publicado em 1874, ele afirma:

*Como a ação dos motores e das máquinas é muitas vezes continuada e de maneira uniforme, os números que servem para calcular o trabalho podem tornar-se embaraçosos pela sua duração, e então é conveniente tomar para sua medida relacionada com a unidade de tempo, por exemplo, o segundo, o minuto, etc. (PONCELET, 1874 apud OLIVEIRA, 2006, p. 240).*

Apesar de haver incertezas em termos da nomenclatura e das unidades, a formalização do conceito de potência mecânica é feita por Poncelet. Assim, o parâmetro tempo finalmente vai ser introduzido e levado em consideração no cálculo do valor econômico (OLIVEIRA, 2006, p. 241).

#### IX. O problema do rendimento

Os engenheiros politécnicos citados – e outros – sempre tiveram como um dos objetivos, no aprimoramento da teoria sobre o funcionamento das máquinas, o desejo por um maior rendimento mecânico. Fazia parte de suas preocupações, qual a maneira mais vantajosa de se aplicar uma potência motriz na máquina em movimento de forma que ela produzisse o maior efeito possível. Era sabido que de qualquer maneira que se considerasse o choque entre as partes das máquinas, existiria, necessariamente, uma perda de quantidade de ação. Por exemplo, Lazare Carnot sugeriu que:

*Para se obter das máquinas o maior efeito possível, é muito importante que elas sejam construídas de maneira que o movimento não varie senão por graus insensíveis. Devemos somente excetuar aqueles que por sua natureza mesma são passíveis de suportar diferentes percussões, como são a maior parte dos moinhos. Mas mesmo nesse caso, é evidente que deve ser evitada toda variação brusca que não seja essencial à constituição da máquina (CARNOT 1803 apud OLIVEIRA, 2006, p. 203).*

Porém, quando discute “[...] qual deve ser o meio de se produzir o maior efeito possível, ele afirma que este problema depende de circunstâncias particulares e que não comporta uma solução geral a ser aplicada a todos os casos” (OLIVEIRA, 2006, p. 204). Não podemos perder de vista que essa procura dos engenheiros politécnicos pelo aumento da eficiência do

maquinário industrial estava restrita à mecânica racional. Ou seja, pretendia-se que o trabalho exercido em determinado trecho de uma máquina fosse “transferido” para outro trecho com a menor perda de movimento possível. Pensava-se, então, em redução do atrito e dos choques contrários ao movimento para que uma maior quantidade de “força viva” fosse conservada. Mas essa grandeza – “ $mv^2$ ” – ainda não tinha, para esses personagens, o *status* de energia no sentido moderno. Dessa forma, em nenhum momento eles aventaram a possibilidade das perdas de movimento – ou de trabalho – serem transformadas em calor.

Outro detalhe, a atenção deles estava voltada para a transferência de movimento – ou de trabalho – deixando de fora a análise sobre as fontes térmicas que originavam o vapor. Responsável pelo funcionamento de todo o maquinário moderno da época. Enfim, havia o esgotamento das possibilidades da mecânica racional em dar conta de todos os fenômenos que ocorrem nas máquinas. “É desta forma e seguindo este curso dos acontecimentos que vai surgir a termodinâmica, inicialmente como uma ciência das máquinas e somente depois como uma ciência dos processos gerais da natureza” (OLIVEIRA, 2006, p. 235). Contudo, a história dos conceitos científicos não é linear. Em paralelo ao estudo realizado pelos engenheiros politécnicos franceses, vários outros ramos do conhecimento físico estavam sendo pesquisados por outros cientistas, inclusive, os fenômenos térmicos. Assim, para uma melhor compreensão do assunto, vamos descrever outras contribuições, advindas de diferentes domínios da física, que também desempenharam um papel relevante para o estabelecimento do princípio de conservação da energia, na sua expressão mais geral.

## **X. A conservação da energia para além da mecânica**

Ao se debruçar sobre o estudo da conservação da energia, Kuhn (2011, p. 95) faz um questionamento interessante: “[...] Por que, entre 1830 e 1850, os conceitos e experimentos necessários a uma completa enunciação da conservação da energia estavam tão próximos da consciência científica?”. O que Kuhn quer saber é por quais motivos vários elementos conceituais e experimentais, importantes para o estabelecimento do princípio da conservação da energia, se tornaram de súbito acessíveis e reconhecíveis, em vários lugares da Europa, em um curto período de tempo. Como exemplo, ele menciona doze homens que, por essa época, “[...] compreenderam sozinhos partes essenciais do conceito de energia e de sua conservação [...]” (KUHN, 2011, p. 91), são eles: Julius Robert von Mayer (1814-1878, Alemanha); Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894, Alemanha), Ludwig August Colding (1815-1888, Dinamarca); James Prescott Joule (1818-1889, Inglaterra); Justus von Liebig (1803-1873, Alemanha); Karl Friedrich Mohr (1806-1879, Alemanha); William Robert Grove (1811-1896, Inglaterra); Michael Faraday (1791-1867, Inglaterra); Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832, França); Marc Séguin (1786-1875, França); Karl Holtzmann (1811-1865, Alemanha); Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890, França). A justificativa de Kuhn para a seleção desses nomes é a seguinte:



*[...] Tentei incluir todos aqueles que, na visão de seus contemporâneos ou sucessores imediatos, alcançaram de forma independente parte significativa da conservação da energia. A esse grupo adicionei Carnot e Hirn, cujo trabalho seguramente seria considerado, caso fosse conhecido. A falta de uma influência efetiva é irrelevante do ponto de vista desta investigação [...] (KUHN, 2011, p. 91-92).*

Antes de aprofundarmos nessa discussão, gostaríamos de expressar a nossa discordância quanto ao termo “descoberta simultânea” escolhido como parte do título de seu ensaio. Não entendemos por que escolheu essa expressão, se ele mesmo afirma que:

*[...] No caso ideal de uma descoberta simultânea, duas ou mais pessoas anunciariam a mesma coisa, ao mesmo tempo, e em total ignorância dos trabalhos uns dos outros, mas nada disso se assemelha nem de longe ao ocorrido durante o desenvolvimento da conservação da energia. As violações da simultaneidade e da influência mútua são secundárias, mas não há dois desses homens que tenham dito a mesma coisa. Até bem perto do fim do período da descoberta, foram poucos os artigos que apresentaram mais do que semelhanças fragmentárias, recuperadas em parágrafos ou sentença isoladas [...] (KUHN, 2011, p. 93).*

Portanto, apenas em retrospecto pode-se dizer que todos os doze cientistas mencionados pesquisaram os mesmos aspectos da natureza. O que se percebe em seus trabalhos não é realmente a descoberta simultânea da conservação da energia, mas, ao contrário, “[...] a rápida e por vezes desordenada irrupção de elementos conceituais e experimentais com base nos quais a teoria seria em breve composta” (KUHN, 2011, p. 94-95). São esses elementos que interessam a Kuhn. Assim, estamos de acordo com Elkana (1970, p. 38, tradução nossa, grifo nosso) quando ele diz:

*[...] O artigo de Kuhn não é apenas o melhor tratamento do nosso problema ainda disponível, mas também rico em sugestões inexploradas e ideias que são apenas insinuadas. No entanto, essa riqueza fica à beira de se tornar um embaraço porque nenhuma posição clara emerge. Sua formulação muito cuidadosa quase contradiz seu próprio título [...].*

O critério mais adequado seria considerar como simultâneas apenas as descobertas que respondessem aos mesmos problemas (ELKANA, 1970). Desse modo, Kuhn precisaria aprofundar mais a sua pesquisa, não enfatizando apenas o paralelismo e a semelhança entre as várias propostas. Teria que mostrar também “[...] as importantes diferenças entre os problemas estudados por esses doze autores, a metodologia por eles utilizada, a conceituação adotada e a base empírica utilizada em cada um dos casos [...]” (MARTINS, 1984, p. 77). Em suma, nas palavras do próprio Kuhn (2011, p. 94), “[...] embora indique o tema central deste

artigo, a expressão ‘descoberta simultânea’ não o descreve, caso seja tomada ao pé da letra [...]”.

Voltando ao seu questionamento, ele afirma ser impossível elencar todos os quase incontáveis fatores que motivaram individualmente os doze cientistas a fazerem suas descobertas. No entanto, após uma análise minuciosa dos trabalhos, observa-se que há alguns fatores mais significativos e específicos do período. A saber: disponibilidade dos processos de conversão; interesse pelas máquinas e a *Naturphilosophie*. Antes de 1800, já se conheciam alguns processos de conversão, como o uso dos geradores de eletricidade estática para produzir reações químicas. Também não era novidade que em algumas reações químicas surgiam tanto a luz quanto o calor. Nas máquinas a vapor ou acionadas por água, era visível que a força latente no combustível ou na queda da água eram convertidas em força mecânica capaz de erguer peso. Ou podia produzir movimento que, por sua vez, gerava calor por atrito ou impacto.

*[...] Contudo, no século XVIII, esses fenômenos permaneciam isolados, poucos pareciam centrais para a pesquisa científica, e mesmo estes eram estudados por grupos diferentes. Foi somente na década de 1830, quando pouco a pouco foram classificados em conjunto com os muitos exemplos descobertos seguidamente pelos cientistas do século XIX, é que começaram de fato a se parecer com processos de conversão. Nessa altura, era inevitável que nos laboratórios os cientistas passassem de diversos fenômenos químicos, térmicos, elétricos, magnéticos ou dinâmicos para outros fenômenos de quaisquer desses tipos e também ópticos. Problemas antes separados ganhavam múltiplas inter-relações [...]* (KUHN, 2011, p. 97).

A bateria inventada por Alessandro Volta, em 1800, contribuiu, direta e indiretamente, para o desenvolvimento dessa relação mútua entre os processos de conversão. O primeiro fruto veio com a teoria do galvanismo francesa e inglesa que atribuía a eletricidade proveniente da bateria à transformação das “forças de afinidade química” em corrente elétrica. Notava-se, além disso, que a corrente elétrica produzia calor e, em circunstâncias apropriadas, luz. Várias outras descobertas de conversões notáveis foram possíveis graças ao uso da bateria, conseqüentemente, da corrente elétrica. Podemos citar, entre outras, a demonstração dos efeitos magnéticos da corrente elétrica por Oersted, em 1820. A descoberta do “efeito termoeletrico” feita pelo físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831) – mais tarde conhecido como *efeito Seebeck* – de que o calor aplicado a um par bimetálico produzia uma corrente elétrica. Em 1834, o físico francês Jean-Charles-Athanase Peltier (1785-1845) reverteu esse impressionante exemplo de conversão. Ele mostrou que uma junção de dois metais se tornava mais quente quando era percorrida por uma corrente elétrica em certo sentido, e se esfriava, quando esse sentido era invertido, constituindo-se em um “efeito eletrotérmico” –

mais tarde conhecido como *efeito Peltier* (KUHN, 2011; BASSALO, 1992; WHITTAKER, 1951).

Todavia, Kuhn esclarece que nem todos os pioneiros vislumbraram a ideia de conservação da energia como uma consequência de uma análise de toda a rede de processos de conversão tomados em conjunto. Isso aconteceu apenas com Faraday e Grove. O primeiro fez, em 1834, uma série de seis conferências sobre as novas descobertas na química e no galvanismo. A sexta tinha o título sugestivo *Relations of Chemical Affinity, Electricity, Heat, Magnetism, and Other Powers of Matter*. Em suas anotações, Faraday (1834 apud Kuhn, 2011, p. 101) afirma que “[...] Não podemos dizer que nenhum [desses poderes] seja a causa dos demais, mas apenas que todos estão conectados e são devidos a uma causa comum [...]”. Algo parecido disse Grove, em 1843, em sua famosa série de conferências *On the Correlation of Physical Forces*. Ele declarou que qualquer um dos vários agentes imponderáveis – calor, luz, eletricidade, magnetismo, afinidade química e movimento – pode, como uma força, produzir os demais ou ser neles convertidos (KUHN, 2011, p. 102). Mas, apesar de outros pioneiros terem se inspirados em outras fontes, de alguma maneira, os processos de conversão desempenharam um papel importante para a consolidação de suas ideias sobre a conservação da energia. É o que explica Kuhn:

*[...] Mohr, por outro lado, tirou a ideia de conservação de uma fonte muito diferente, provavelmente metafísica. Mas, como veremos, é apenas porque tentou elucidar e defender essa ideia nos termos dos novos processos de conversão que a concepção inicial de Mohr se parece com a conservação da energia. Mayer e Helmholtz apresentam ainda outra abordagem. Começaram aplicando seus conceitos de conservação a fenômenos mais antigos, bem conhecidos. Mas até entenderem suas teorias às novas descobertas, não estavam desenvolvendo a mesma teoria que, digamos, Mohr e Grove. Outro grupo ainda, formado por Carnot, Séguin, Holtzmann e Hirn, ignorou completamente os novos processos de conversão. Mas não seriam descobridores da conservação da energia se estudiosos como Joule, Helmholtz e Colding não tivessem mostrado que os fenômenos térmicos, com os quais trabalhavam esses engenheiros do calor, eram partes integrais da nova rede de conversões (KUHN, 2011, p. 98-99).*

No entanto, um passo decisivo ainda faltava a ser dado para se chegar a concluir que além de ter uma conversibilidade universal dos poderes naturais – calor, luz, eletricidade, magnetismo, afinidade química e movimento – deveria haver uma conservação do poder. De acordo com Kuhn (2011, p. 102), isso aconteceu pela aplicação dos princípios filosóficos da igualdade entre causas e efeitos e da impossibilidade do movimento perpétuo.

*[...] Uma vez que qualquer poder é capaz de produzir qualquer outro e ser por ele produzido, a igualdade entre causas e efeitos exige uma*

*equivalência quantitativa uniforme entre cada um dos pares de poderes. Se não houver essa equivalência, uma série de conversões escolhida de modo adequado resultaria na criação de poder, ou seja, em movimento perpétuo. Em todas as suas manifestações e conversões, o poder tem de ser conservado. Essa compreensão não ocorreu nem de uma vez, nem a todos, nem com perfeito rigor lógico, mas ocorreu (KUHN, 2011, p. 102).*

Nesse ponto, entra o segundo fator apontado por Kuhn como decisivo para a consolidação do princípio da conservação da energia, o interesse pelas máquinas. Principalmente, o conceito de trabalho. Conforme assinala Kuhn (2011, p. 106-107):

*Como grupo, os pioneiros se preocuparam muito pouco com a energia do movimento, e menos ainda em utilizá-la como medida quantitativa fundamental. O que de fato utilizaram, ao menos os que foram mais bem-sucedidos, foi fs, o produto da força pela distância, uma quantidade conhecida por vários nomes: efeito mecânico, poder mecânico, trabalho. Essa quantidade, porém, não aparece como uma entidade conceitual independente na literatura da dinâmica. Mais precisamente, mal aparece até 1820, quando a literatura francesa (e apenas esta) foi enriquecida de súbito por uma série de trabalhos sobre assuntos como a teoria das máquinas ou a mecânica industrial. Esses livros, com efeito, tornaram o trabalho uma entidade conceitual independente e importante, e ainda a relacionaram de forma explícita à vis viva. Mas o conceito não foi inventado por esses livros. Ao contrário, decorreu de um século de práticas de engenharia em que, em geral, sua utilização era completamente independente da vis viva e de sua conservação. Essa fonte interna à tradição da engenharia é tudo que os pioneiros da conservação da energia precisavam e foi tudo que a maioria deles usou.*

Por exemplo, Joule e Liebig ao se interessarem pelo rendimento dos motores elétricos, em comparação com o das máquinas a vapor, queriam saber quanto peso cada uma delas podia erguer, a uma distância fixa, para o mesmo gasto de carvão ou zinco. Esse questionamento necessita de um coeficiente de conversão para ser adequadamente respondido (KUHN, 2011; MARTINS, 1984). Aparentemente, as descobertas dos processos de conversão e o interesse pelas máquinas já englobam todas as ferramentas necessárias para entender por que nessa época, entre 1830 e 1850, os conceitos e experimentos necessários a uma completa enunciação da conservação da energia estavam tão próximos da consciência científica. Entretanto, de acordo com Kuhn (2011, p. 116-117, grifo nosso):

*[...] uma última olhadela nos artigos dos pioneiros suscita um sentimento desconfortável de que ainda falta algo, talvez algo que não seja um componente substancial. Não teríamos essa sensação se os pioneiros*

*ros, à semelhança de Carnot e Joule, tivessem começado com um problema técnico bem delineado e prosseguido aos poucos até atingir o conceito da conservação da energia. Com Colding, Helmholtz, Liebig, Mayer, Mohr e Séguin, a noção de uma força metafísica, imperecível e subjacente parece ser anterior à sua pesquisa e não tem quase relação com ela. Podemos dizer, sem meias palavras, que **esses pioneiros parecem ter adotado uma ideia capaz de se tornar conservação da energia antes mesmo de encontrar evidências para isso**. Os fatores já apresentados neste artigo podem explicar como, afinal, eles puderam lhe dar outra roupagem e, com isso, um sentido. Mas a discussão ainda não esclarece suficientemente a existência dessa ideia. Entre doze pioneiros, um ou dois casos não causariam incômodo. As fontes de inspiração científica são notoriamente inescrutáveis, mas a presença de uma lacuna importante em seis dos doze casos é surpreendente. Embora não possa resolver completamente o problema que isso representa, devo ao menos considerá-lo.*

O que Kuhn está dizendo é que muitos dos descobridores da conservação da energia estavam consideravelmente predispostos a perceber uma única e indestrutível força na raiz de todos os fenômenos naturais. Embora essa predisposição seja mencionada por vários historiadores como sendo o resíduo de uma metafísica que já estava presente na controvérsia da conservação da *vis viva*, ele defende que a influência principal se deve à *Naturphilosophie*. O terceiro e último fator responsável pela consolidação do princípio da conservação da energia, em sua visão. A *Naturphilosophie* foi um movimento romântico que surgiu na Alemanha, no final do século XVIII. Reagindo contra o Iluminismo francês, valorizava a intuição e a vontade humana. Ela foi articulada filosoficamente por Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775-1854). Segundo Kuhn:

*Ao colocar o organismo como a metáfora fundamental de sua ciência universal, os seguidores da **Naturphilosophie** buscavam sempre um princípio unificador para todos os fenômenos naturais. Schelling, por exemplo, sustentava “que os fenômenos magnéticos, elétricos, químicos e, finalmente, até mesmo os orgânicos deveriam se entrelaçar, formando uma grande associação... [que] se estende por toda a natureza”. Antes até da descoberta da bateria, insistia que “sem dúvida alguma, apenas uma única força se manifesta, em suas variadas formas, na luz, na eletricidade, e assim por diante” [...] Como um **Naturphilosoph**, Schelling sempre procurou nas ciências de sua época processos de transformação e conversão [...] Muitos dos seguidores de Schelling [...] davam uma ênfase similar aos novos processos de conversão [...] (KUHN, 2011, p. 120).*

Apesar de esse ensaio de Kuhn ser considerado por Elkana (1970), Bevilacqua (1993), Martins (1984), Souza Filho (1992) – e outros – como o que apresenta o melhor re-

trospecto sobre o estabelecimento final do princípio da conservação da energia, ele não está imune a críticas. O que significa dizer que não há um consenso entre os fatores apresentados por Kuhn, nem de sua análise. Elkana (1970), por exemplo, além de discordar da expressão “descoberta simultânea”, concorda inteiramente apenas com o terceiro fator apontado. Em suas palavras, uma crença *a priori* em princípios gerais de conservação na Natureza. Além desse, ele atribui a enunciação completa do princípio da conservação da energia aos seguintes fatores:

- Uma constatação de que não é suficiente que as duas formulações da mecânica, a vetorial-newtoniana e a escalar-analítica-lagrangiana, sejam matematicamente equivalentes; elas devem também estar conceitualmente correlacionadas;
- Uma consciência do problema fisiológico do “calor animal” ou mais geralmente das “forças vitais”, e uma crença de que essas são redutíveis às leis da natureza inanimada;
- Uma certeza de que seja qual for a entidade que é conservada na natureza ela deve ser expressa em termos matemáticos, sendo necessário uma destreza matemática para lidar com ela.

O único dos pioneiros citados por Kuhn que preenchia todos esses pré-requisitos, no entender de Elkana (1970), era Helmholtz. Por consequência, foi quem formulou matematicamente, pela primeira vez, o princípio da conservação da energia em toda a sua generalidade. De acordo com Elkana (1970, p. 55), Helmholtz tinha lido os trabalhos de Newton, Euler, d’Alembert e Lagrange. Desse modo, tinha ciência das duas tradições na mecânica. Estava claro para ele, portanto, que o conceito central na mecânica vetorial-newtoniana era o de força. Não fazendo parte de sua estrutura os princípios de conservação. Ao contrário do que acontecia com a mecânica escalar-analítica-lagrangiana, que se apoiava em torno da conservação da soma da *vis viva* e da “função potencial”. Aliado a isso, Helmholtz possuía uma formação filosófica de influência kantiana, acreditando que há na Natureza qualquer coisa que se conserva. Ele era também um fisiologista, estando por dentro do problema das “forças vitais” e do “calor animal”. Sendo um mecanicista convicto, ele considerava as “forças vitais” como qualquer outra força, devendo, dessa maneira, ser conservada. Por último:

*[...] No topo de tudo, Helmholtz foi um matemático de primeiro nível. Ele viu muito claramente que se << Kraft >> é conservada na natureza, e energia mecânica é conservada na mecânica, então, todas << Kraft >> devem ter a mesma dimensão física como a energia mecânica e devem ser, além disso, conversível a ela. Isso é exatamente o que ele fez em seu artigo de 1847 [...] (ELKANA, 1970, p. 56, tradução nossa).*

De nossa parte, vemos no levantamento feito por Kuhn uma análise mais completa e imparcial. Elkana apenas deu ênfase na formulação matemática do princípio da conservação da energia, elegendo os seus fatores a partir do que Helmholtz apresentava.

## **XI. O equivalente mecânico do calor**

Entre todos os processos de conversão apresentados por Kuhn, o ponto de partida de muitos autores, para encontrar a “equivalência quantitativa uniforme entre cada um dos pares de poderes”, foi a relação numérica entre o trabalho feito sobre um corpo e o calor produzido. Conhecido como “o equivalente mecânico do calor”. Uma vez estabelecida essa relação, não foi difícil aplicar a mesma ideia a outras conversões energéticas (MARTINS, 1984, p. 67). Houve, na ocasião, uma polêmica entre Joule e Mayer sobre quem fez isso pela primeira vez, de modo satisfatório. Atualmente, com a análise dos textos históricos, se aceita que o mérito deva ser dado a Mayer (MARTINS, 1984; MACH, 1986; WISNIAK, 2008). Na parte II desse artigo, veremos as principais contribuições desses dois atores e de Kelvin para o desenvolvimento do conceito físico de energia. Em seguida, daremos a nossa sugestão de como abordar esse conceito em sala de aula.

## **XII. Comentários finais desta primeira parte do artigo**

Ao longo do artigo, mostramos como a construção do conceito físico de energia está intimamente ligada com a construção do princípio de conservação da energia. Desse modo, seguindo a afirmação de Lindsay (1975) de que esse princípio surgiu em decorrência da busca que alguns pesquisadores tiveram por algo que ficasse constante no meio das mudanças observadas, apresentamos alguns exemplos que corroboraram esse argumento.

### **Referências**

- BARRA, E. S. A metafísica cartesiana das causas do movimento: mecanicismo e ação divina. *Scientiae Studia*, v.1, n. 3, p. 299-322, 2003.
- BASSALO, J. M. A crônica do calor. In: BASSALO, J. M. **Crônicas da Física**: tomo 3. Belém: Universitária UFPA, 1992. p. 849-933.
- BEVILACQUA, F. Helmholtz's uber die erhaltung der kraft: the emergence of a theoretical physicist. In: CAHAN, D. (Ed.). **Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth-century science**. Los Angeles: University of California Press, 1993. p. 291-333.
- BEYNON, J. Some myths surrounding energy. *Physics Education*, v. 25, 1990. p. 314-316.
- CARVALHO, A. M. P. Construção do conhecimento e Ensino de Ciências. **Em Aberto**, Brasília, ano 11, n. 55, 1992.
- COELHO, R. L. On the concept of energy: how understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, v. 18, n. 8, p. 961-983, 2007.
- COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova Física**. Lisboa: Gradiva, 1988.

- CROMBIE, A. C. **Historia de la ciencia: de San Agustin a Galileo**. Madrid: Alianza, 1983.
- CUSTÓDIO, J. F.; PIETROCOLA, M. Princípios nas ciências empíricas e o seu tratamento em livros didáticos. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 3, p. 383-399, 2004.
- DEBUS, A. G. **Man and nature in Renaissance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- DELON, M. **L'idée d'énergie au tournant des lumières**. PUF, 1988.
- DESCARTES, R. **Princípios da filosofia**. Tradução: João Gama. Lisboa: Edições 70, 1997.
- DRIVER, R. Teaching energy in schools: towards an analysis of curriculum approaches. In: DRIVER, R.; MILLAR, R. (Eds.). **Energy Matters-Proceedings of an Invited Conference: teaching about energy within the secondary school**. Leeds: University of Leeds, 1986. p. 9-24.
- DUIT, R. Understanding energy as a conserved quantity - remarks on the article by Sexl. **European Journal of Science Education**, v. 3, p. 291-301, 1981.
- \_\_\_\_\_. Should energy be illustrated as something quasi-material? **International Journal of Science Education**, v. 9, n. 2, p. 139-145, 1987.
- ELKANA, Y. The conservation of energy: a case of simultaneous discovery?. **Archives Internationales d'Histoire des Sciences**, v. 23, p. 30-60, 1970.
- \_\_\_\_\_. **The discovery of the conservation of energy**. Massachusetts: Harvard University Press, 1974.
- GALILEI, G. **Dialogues concerning two new sciences**. Tradução: Henry Crew e Alfonso de Salvio. New York: The Macmillan Company, 1914.
- \_\_\_\_\_. **Diálogos sobre os dois máximos sistemas - do mundo Ptolomaico e Copernicano**. Tradução: Pablo Rubén Mariconda. São Paulo: Discurso Editorial / FAPESP, 2001.
- GAUKROGER, S. **Descartes: uma biografia intelectual**. Rio de Janeiro: EdUERJ - Contraponto, 1999.
- GRANT, E. **The foundations of modern science in the Middle Ages: their religious, institutional, and intellectual contexts**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- HARMAN, P. M. **Energy, force and matter**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- HIEBERT, E. N. **Historical roots of the principle of conservation of energy**. Madison: Logmark, 1962.



ILTIS, C. D'Alembert and the *vis viva* controversy. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 1, n. 2, p. 135-144, 1970.

\_\_\_\_\_. Leibniz and the *vis viva* controversy. **Isis**, v. 62, n. 1, p. 21-35, 1971.

KUHN, T. S. A conservação da energia como exemplo de descoberta simultânea.” In: KUHN, T. S. (Org.). **A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica**. Tradução: Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Unesp, p. 89-126, 2011.

LEIBNIZ, G. W. **Discurso de Metafísica**. Tradução: Marilena de Souza Chauí. São Paulo: Abril Cultural, 1983.

LINDSAY, R. B. **Energy: historical development of the concept**. Stroudsburg, Pennsylvania: Halsted Press, 1975.

LUCIE, P. **Física básica: a gênese do método científico**. Rio de Janeiro: Campus, 1977. v. 1.

MACH, E. **History and root of the principle of conservation of energy**. Tradução: Philip E. B. Jourdain. Chicago: The Open Court Publishing, 1911.

\_\_\_\_\_. **Principles of the theory of heat: historically and critically elucidated**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986.

MARTINS, R. A. Mayer e a conservação da energia. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 6, p. 63-95, 1984.

\_\_\_\_\_. Como não escrever sobre História da Física - um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, p. 113-129, 2001.

\_\_\_\_\_. Introdução. A história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C. C. (Ed.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. XXI-XXXIV.

MEDEIROS, A. A atualidade pedagógica da controvérsia histórica sobre a verdadeira definição da "força de um corpo". **Ensaio**, v. 3, n. 1, p.1-19, 2001.

MULLER, I. **A history of thermodynamics: the doctrine of energy and entropy**. New York: Springer, 2007.

OLIVEIRA, A. R. E. **A evolução do conceito físico de trabalho no contexto das máquinas**. 2006. 289 f. Tese (Doutorado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PONCZEK, R. L. A polêmica entre Leibniz e os cartesianos:  $mv$  ou  $mv^2$ . **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 17, n. 3, p. 336-347, 2000.

RANKINE, W. J. M. **Miscellaneous scientific paper**. Londres: Charles Griffin and Company, 1881.

SCHENBERG, M. **Pensando a Física**. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 1985.

SEXL, R. U. Some observations concerning the teaching of the energy concept. **European Journal of Science Education**, v. 3, n. 3, p. 285-288, 1981.

SMITH, G. E. The *vis viva* dispute: a controversy at the dawn of dynamics. **Physics Today**, v. 59, n. 10, p. 31-36, 2006.

SOLOMON, J. Learning about energy: how pupils think in two domains. **European Journal of Science Education**, v. 5, n. 1, p. 49-59, 1983.

\_\_\_\_\_. **Getting to know about energy in school and society**. New York: The Falmer Press, 1992.

SOUZA FILHO, O. M. Helmholtz e a conservação da energia. In: ÉVORA, F. R. R. (Org.). **Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea**. Campinas: Unicamp, 1992. p. 377-404.

TAIT, P. G. On the history of thermodynamics. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 28, p. 288-292, 1864.

TEIXEIRA, O. P. B.; ASSIS, A. Algumas considerações sobre o ensino e a aprendizagem do conceito de energia. **Ciência e Educação**, v. 9, n. 1, p. 41-52, 2003.

VALENTE, M. J. P. **A pedagogia do conceito de energia: contributo para a utilização formativa do conceito de energia**. 1993. 289 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Educação) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Secção de Ciências da Educação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

\_\_\_\_\_. **Uma leitura pedagógica da construção histórica do conceito de energia: contributo para uma didáctica crítica**. 1999. 603 f. Tese (Doutorado em Ciências da Educação) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Secção de Ciências da Educação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

VARIGNON, P. **Nouvelle mecanique ou statique, dont le projet fut donne**. Paris, 1725. v. 2.

WARREN, J. W. The nature of energy. **European Journal of Science Education**, v. 4, p. 295-297, 1982.

\_\_\_\_\_. At what stage should energy be taught?. **Physics Education**, v. 21, n. 3, p. 154-156, 1986

WEISHEIPL, J. A. The interpretation of Aristotle's physics and the science of motion. In: KRETZMANN, N.; et al. (Eds.). **The Cambridge history of later medieval philosophy**:

**from the rediscovery of Aristotle to the disintegration of scholasticism 1100-1600.**  
Cambridge: Cambridge University Press, p. 521-536, 1982.

WHITTAKER, E. **A history of the theories of aether and electricity: the classical theories.**  
v. 1. Toronto: Thomas Nelson and Sons, 1951.

WILSON, M. **A energia.** Rio de Janeiro: José Olympio, 1968.

WISNIAK, J. Conservation of energy: readings on the origins of the first law of thermodynamics - Part II. **Educación Química**, v. 19, n. 3, p. 216-225, 2008.

YOUNG, T. **A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts.** Edição:  
KELLAND, M. A. v. 1. London: Taylor and Walton, 1845.