

1 – O que é energia?

1.1 – Uma questão fundamental

Pergunte a uma pessoa “você sabe o que é energia?” e ela provavelmente responderá que sim. Peça para ela definir energia, e as reações podem ser as mais variadas: dar de ombros, arregalar os olhos como quem diz “porque eu?”, ou começar uma longa digressão sobre as mais variadas formas específicas de energia. Pois no caso, é mais fácil tratar as formas específicas, como a “energia cinética”. É fácil entender que um trem em alta velocidade possui muita energia, assim como uma barra de ferro em brasa. Porém é difícil definir “energia” simplesmente. Por que isso é assim?

O conceito de energia, aproximadamente na sua forma atual, é algo recente. Um personagem central nessa concepção foi Julius von Mayer, um médico e físico alemão que gostava de estudar o calor, tanto em relação às máquinas como em relação à vida. Na época, conceitos como força, potência, energia não tinham um significado muito preciso. Em 1841 ele publicou um artigo intitulado “Sobre a Determinação Qualitativa e Quantitativa de Forças” (no inglês *“On the Quantitative and Qualitative Determination of Forces”*) onde ele declara “energia não pode ser criada ou destruída”. Por isso, ele é creditado como sendo o primeiro a declarar a lei de conservação de energia. Ele e James Joule se envolveram numa disputa sobre quem possuía prioridade na demonstração experimental do “equivalente mecânico do calor”.

Como acontece comumente na ciência, as ideias Mayer e Joule não foram bem recebidas no início. Somente quando grandes figuras da sociedade científica da época, como William Thomson (Kelvin) e John Tyndall começaram a dar crédito aos trabalhos de ambos é que o conceito de conservação da energia começou a ter maior penetração no meio científico.

Por outro lado, é equivocado imaginar que Mayer propôs a lei de conservação de energia a partir de um surto repentino de genialidade. Toda descoberta científica tem um contexto, em geral bastante complexo e tema para historiadores da ciência. Leis de conservação de outras coisas já haviam sido propostas. No séc XVII Newton formulou suas leis da mecânica baseando-se no conceito de conservação do momento. No séc. XVIII, décadas antes de Lavoisier pronunciar sua famosa frase “nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”, muitos indivíduos já haviam proposto a lei de conservação de massa dos reagentes em reações químicas.

Outro exemplo é o caso do calórico. Nicolas Sadi Carnot é considerado o pai da termodinâmica devido a sua dedicação ao estudo das máquinas a vapor, que na sua época já estavam presentes na Europa bombeando água de minas de carvão, movendo barcos, locomotivas e indústrias. Ele deu grandes contribuições para a compreensão das máquinas térmicas, as quais veremos em capítulos posteriores. Como era comum na sua época, Carnot acreditava que o calor era uma substância denominada calórico. Nessa concepção, sistema constituído de um corpo quente em contato com um corpo frio atingiria o equilíbrio térmico por meio da troca do fluxo de calórico do mais quente para o mais frio. Até hoje, expressões que usamos, como “fluxo de calor”, é uma herança desse ponto de vista. Em seu livro

“Reflexões Sobre o Poder Motriz do Fogo”, publicado em 1824, Carnot defende o princípio de conservação do calórico escrevendo:

“Esse fato nunca foi questionado. Foi admitido inicialmente sem ponderação, e verificado posteriormente por experimentos com calorímetro em diversos casos. Negar este princípio seria arruinar toda a teoria do calor sobre a qual ele é baseado”.

O princípio que ele tanto acreditava foi mais tarde considerado equivocado frente aos resultados dos experimentos pioneiros de Mayer, Joule e outros. Vale ressaltar que na época de Carnot, o conceito de *vis viva* proposto por Leibniz ainda era cogitado por cientistas. Desde a época de Leibniz e Newton até então, a diferença entre energia cinética e momento não estava estabelecida, e o conceito de *vis viva* era considerado uma alternativa ao modelo de conservação de momento proposto por Newton. Segundo esse modelo, um objeto em movimento era dotado de um “fluido de movimento”. Por exemplo, quando uma bola de bilhar em movimento colide com outra bola parada, a primeira transfere *vis viva* para a segunda. A segunda, agora imbuída de *vis viva*, passa a se movimentar também. Pode-se dizer que as leis de conservação do calórico e *vis viva* eram formas rudimentares de princípios de conservação de energia térmica e energia cinética respectivamente, ou seja, acreditava-se que propriedades mecânicas e térmicas não tinham relação entre si. Sob a luz de experimentos que demonstravam que energia mecânica podia se transformar em energia térmica e vice-versa, gradualmente os conceitos de conservação de calórico e *vis viva* foram sendo preteridos em favor do conceito mais abrangente de conservação de energia.

Hoje em dia a conservação de energia é um princípio praticado e aceito sem muita reflexão. Se fosse feito uma enquete com cientistas atuais com a pergunta “você acredita na lei da conservação da energia?”, a grande maioria diria que sim, o que é bastante razoável. Muitos poderiam sustentá-la com um argumento muito parecido com o argumento do Carnot sobre a conservação do calórico, o que já não é razoável. Note que a obsolescência do calórico não implicou na ruína do trabalho de Carnot. O modelo construído por ele ainda é válido e é a base para a teoria de máquinas térmicas ensinada das universidades. A conservação da energia é um princípio válido. Até hoje se mostrou muito útil para a compreensão dos fenômenos naturais e é muito difícil haver algum embasamento empírico no sentido de desqualificar o princípio. Porém, temos que ter cautela, e não qualificar a lei de conservação de energia como verdadeira. Observe que já não podemos dizer isso sobre a conservação de *vis viva*, de calórico, e até mesmo de massa (na concepção de Lavoisier como veremos adiante). Não podemos excluir a possibilidade de que experimentos futuros nos forcem a rever o princípio de conservação de energia. E isso não significará a ruína de toda a física feita até hoje, da mesma forma que a mecânica newtoniana tem seu espaço mesmo depois da relatividade. Nesse contexto, quando lemos uma sentença do tipo “antigamente acreditava-se que a luz era uma onda que se propaga no éter, hoje nós sabemos que, na verdade, a luz é uma onda eletromagnética”, o autor presta um desserviço. Implícita na sentença está a ideia de que as hipóteses antigas eram tolas, as de hoje são as provadas e verdadeiras. Essa postura pode ser danosa para a ciência. Como já dito, as ideias de Mayer e Joule não foram bem recebidas inicialmente, inclusive por Kelvin. Esse tipo de rejeição muitas vezes está relacionado com essa concepção de que a ciência expressa a verdade, mesmo que muitos cientistas

admitam que se trata de uma expressão imperfeita da verdade. Por outro lado, esforços para a preservação de paradigmas podem ser úteis. O caso do neutrino é um exemplo interessante. Resultados experimentais obtidos por James Chadwick em 1914 mostraram que o espectro da radiação beta é contínuo. Tratava-se de um resultado difícil de explicar, pois de acordo com os modelos da época, violaria o princípio de conservação de energia. Proeminentes cientistas, como Bohr, chegaram a defender a ideia de que a conservação da energia nem sempre é válida. Por outro lado, houve um grande esforço para preservar o princípio de conservação de energia. Nessa abordagem, o físico Wolfgang Pauli propôs a existência do neutrino em 1930, como sendo uma partícula sem carga e com massa muito pequena e que interagiria com a matéria em eventos extremamente raros. Pauli tinha também outros motivos para propor o neutrino, que se mostraram inadequados mais tarde. Experimentos anunciando a detecção do neutrino ocorreram apenas em 1956, devido às dificuldades experimentais. Vemos aqui como a preservação de um paradigma levou a “previsão” de uma partícula e sua descoberta décadas mais tarde.

No entanto, descaso, resistência e até mesmo hostilidade contra ideias inovadoras na ciência são fenômenos bastante conhecidos, recorrentes e estudados pela filosofia da ciência. É natural que haja, uma vez que a ciência é um empreendimento humano. O trabalho de Carnot passou praticamente despercebido enquanto ele viveu. Os trabalhos de Mayer e Joule enfrentaram resistência às suas ideias no início. Uma evidência do grande cientista que foi Kelvin é que ele logo mudou sua postura em relação a energia e teve uma atitude aberta diante dos novos experimentos. Não só mudou a postura como passou a usar sua influência e advogar em favor da nova concepção. Um grande cientista é, em geral, humilde. Em um jantar comemorando o jubileu de 50 anos de sua cadeira na Universidade de Glasgow, Kelvin declarou:

“Uma palavra caracteriza os mais árduos esforços para o avanço da ciência que realizei perseverantemente durante 50 anos: essa palavra é FRACASSO”.

Em seu livro, “Lições de Física de Feynman”, o autor também adota uma postura humilde ao falar sobre energia:

“É importante nos darmos conta de que em física atualmente, não temos nenhum conhecimento sobre o que é energia”.

Feynman fez uma boa analogia para explicar a questão da energia. Uma mãe dá de presente a seu filho 28 blocos idênticos de madeira para ele brincar. Toda noite ela conta os blocos para verificar se a coleção está completa. Mas a situação começa a ficar complicada. Seu filho tem uma caixa a qual ela não está autorizada a abrir (ela respeita as vontades do filho). As vezes a contagem dos blocos está incompleta e ela suspeita que o restante pode estar dentro da tal caixa. Por isso, toda noite ela faz a medida da massa da caixa e percebe que a variação é sempre um múltiplo da massa de um bloco de madeira, de forma que ela pode verificar que o restante dos blocos está de fato dentro da caixa. Mais adiante, o filho resolve levar alguns blocos para brincar na banheira. A água fica turva com o banho e ela não pode enxergar se os blocos estão imersos ou não. Ela resolve então medir o nível da água antes e depois de cada banho, e verifica que a variação do volume é sempre um múltiplo do volume

de um bloco de madeira. Portanto, a verificação do número de blocos (que se conserva) pode ser feita contando diretamente, ou indiretamente por meio das manifestações da massa da caixa ou do nível da banheira. Segundo Feynman, a questão da energia é semelhante, mas nós nunca enxergamos os “blocos de energia” diretamente. A energia é manifesta indiretamente na forma de aumento de temperatura, ou aumento de velocidade, de altura etc. O que são esses “blocos de energia” nós não sabemos.

Nesse contexto, estamos mais acostumados a tratar da energia em suas formas específicas. As formas mais comuns são¹:

A energia cinética, que no caso linear é expresso da forma

$$K = \frac{mv^2}{2} \quad (1.1)$$

onde K representa a energia cinética, m a massa do objeto em movimento e v a sua velocidade.

A energia potencial gravitacional (U)

$$U = mgh \quad (1.2)$$

onde g é a aceleração da gravidade local e h é a altura relativa em que se pretende quantificar a energia potencial.

A energia potencial elástica (U) (no caso de um sistema massa-mola)

$$U = \frac{kx^2}{2} \quad (1.3)$$

onde k é a constante elástica da mola e x é o comprimento de deformação da mola.

A energia térmica adicionada ou retirada de um corpo

$$\Delta Q = mc_p \Delta T \quad (1.4)$$

onde ΔQ é a variação de energia térmica, c_p é o calor específico do corpo e ΔT é a variação de temperatura.

A energia no contexto termodinâmico

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (1.5)$$

Onde ΔU é a variação da energia interna do fluido, ΔQ é a variação de energia térmica e ΔW é o trabalho realizado.

A energia equivalente à massa

$$E = mc^2 \quad (1.6)$$

¹ Nesse momento não estamos interessados na derivação ou demonstração das expressões, apenas na discussão sobre as diferentes manifestações da energia.

onde E é energia e c é a velocidade da luz. A Eq. 1.6 foi proposta por Einstein e explica a grande energia gerada nas reações nucleares presentes em bombas e usinas atômicas. Segundo essa expressão, em certas reações a massa não se conserva e parte dela pode se transformar em energia. Sendo assim, o advento da era nuclear fez com que a lei de conservação das massas defendida por Lavoisier não seja sempre válida. Novamente, devemos salientar que esse fato não acarretou na invalidação de toda a teoria química desenvolvida até então. Hoje em dia, os cientistas continuam usando a estequiometria, praticamente da mesma forma como vinham fazendo desde a época de Lavoisier. Há apenas que se prestar atenção ao tipo de reação em questão. Uma vez se tratando de reações nucleares, considera-se a conservação de massa em uma forma especial.

Outras manifestações específicas de energia podem ser citadas. Existe a energia de radiação, energia elétrica, energia química etc. Além disso, no contexto da energia, a ciência estuda também as diferentes formas de conversão de energia. Algumas conversões são óbvias, outras estão longe disso. Vamos discutir um caso bem simples: o pêndulo simples.

Ao longo da história, o pêndulo foi analisado de diferentes pontos de vista. Os gregos, por exemplo, possuíam o modelo dos elementos água, ar, terra e fogo e usavam-no para entender a natureza. Os elementos se atraíam por similaridade, e isso explicaria a queda dos objetos maciços até o solo, o fluxo do rio até o mar e a fumaça subindo ao céu. Como vemos, o modelo cumpria o seu papel para a época tendo um poder explicativo. Nessa concepção, Aristóteles via o pêndulo como um artefato que apresenta um processo de queda frustrada. Enquanto manifesta um movimento descendente, a massa tenta chegar ao ponto que lhe é natural, ou seja, o mais próximo possível do solo. Mas ao atingir esse ponto, as configurações do sistema faziam-na afastar-se desse “ponto ideal” iniciando o processo ascendente. A massa então procurava retornar aquele ponto mais baixo, desacelerando no processo de subida e retomando o processo de descida. E assim o processo se repetia, com a massa sempre procurando ficar no seu lugar natural. No fim, o processo terminava com o movimento cessando-se com a massa atingindo o ponto mais próximo do solo.

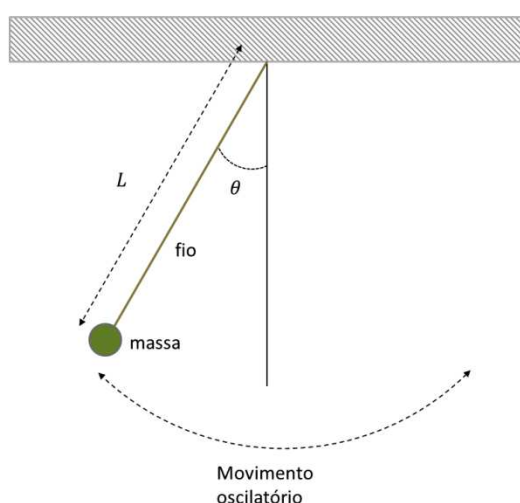


Figura 1.1: Diagrama esquemático de um pêndulo simples.

Já Galileu, em sua famosa observação dos candelabros da catedral de Pisa, compreendeu o pêndulo como um dispositivo que apresenta um movimento oscilatório com uma frequência muito bem determinada. Por muitos séculos desde então, os pêndulos foram considerados os instrumentos mais precisos para a marcação do tempo. Até 1929, a hora oficial dos Estados Unidos era determinada por um relógio de pêndulo.

Podemos enxergar o pêndulo como um mecanismo que ilustra a conversão de energia potencial (Eq. 1.2) e cinética (Eq. 1.1) de forma repetitiva. Em seu ponto mais alto, a massa encontra-se instantaneamente imóvel, apresentando energia cinética nula e o máximo de energia potencial gravitacional. Conforme progride na trajetória descendente, vai perdendo energia potencial e ganhando energia cinética. No ponto de mais baixa altura, podemos dizer que toda a energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética, sendo que esta última manifesta seu valor máximo nesse ponto. Conforme a massa começa a subir novamente, o contrário ocorre até que toda a energia cinética seja novamente transformada em energia potencial gravitacional. Sob o ponto de vista da mecânica, esse processo ocorreria repetidamente de forma oscilatória por tempo indeterminado a não ser que outro tipo de conversão de energia seja levado em conta: a transformação de energia cinética em outras formas dissipativas de energia. Isso explicaria o que normalmente observamos: a diminuição gradual da amplitude de oscilação até que o sistema entre em repouso.

Vemos que um mesmo fenômeno pode ser visto de três pontos de vista diferentes. Discutir qual desses pontos de vista “é o mais correto” seria infrutífero. Faz mais sentido analisar qual deles é mais adequado, ou mais útil em nossa tarefa de entender a natureza e usá-la em nosso favor, como fazemos no caso da tecnologia.

A transformação de energia potencial gravitacional em energia cinética no caso do pêndulo é bastante evidente e por isso pouco controverso, mas outras transformações não possuem a fronteira conceitual bem definida dessa forma. Quando incluímos a questão da transformação em energias dissipativas temos um exemplo dessa problemática. As formas dissipativas de energias podem ser calor, vibração, turbulência, ruído etc. Dificilmente um livro texto fará um tratamento formal sobre a transformação da energia cinética do pêndulo nas diversas formas dissipativas da mesma forma analítica que trata a relação entre sua energia potencial gravitacional e a energia cinética. Isso porque a complexidade da questão é tão maior que um tratamento formal na ciência surgiu apenas recentemente com a participação de personalidades como Clausius, Joule, Kelvin, Boltzmann e Einstein, na esteira dos trabalhos de Mayer sobre “o equivalente mecânico do calor”.

O que queremos chamar a atenção nesse ponto é que estamos mais acostumados a descrever as manifestações específicas da energia e suas transformações. Além disso, toda a ciência é fortemente dependente do contexto. Quando estudamos o problema de um arco que atira uma flecha, estamos mais preocupados com a energia potencial elástica (Eq. 1.3) e a energia cinética adquirida pela flecha (Eq. 1.1). Quando estamos estudando o problema da queima da gasolina, estamos preocupados com a energia química contida nela e no aumento de temperatura de um corpo devido a liberação dessa energia (Eq. 1.4) e eventualmente em

um trabalho realizado (Eq. 1.5). Em nenhum desses casos, estamos preocupados com a transformação de massa em energia (Eq. 1.6). Sabemos disso pela experiência acumulada.

Além disso, o significado de expressões idiomáticas, tais como “energia cinética” e “energia térmica”, por exemplo, também depende do contexto. Intuitivamente sabemos que um trem em movimento possui energia cinética e uma barra de ferro em brasa possui energia térmica. Mas quando analisamos este último caso em uma escala microscópica, normalmente justificamos a energia térmica como energia cinética dos elétrons e íons presentes na barra de ferro. Daí a distinção entre energia térmica e cinética já não é tão clara. Ainda mais quando a energia cinética dos íons da rede se manifesta em movimentos ondulatórios que oscilam entre as energias cinética e potencial. Enormes confusões podem ocorrer se relacionarmos as Eq. 1.1 a 1.5 apenas usando uma lógica matemática sem forte justificativa no âmbito do problema estudado.

Nesse contexto, é interessante salientar o ponto de vista defendido pelo cientista Hungaro-britânico Michael Polanyi, na década de 50. Ele defendeu a influência do que ele chama de “conhecimento tácito (silencioso)” na ciência. O conceito de “conhecimento tácito” pode ser aplicado em diversas áreas da cognição. Por exemplo, você encontra uma pessoa na rua e a reconhece, mesmo depois de 10 anos sem vê-la. Há estudos que mostram que há uma quantidade incontável de fatores que interferem no reconhecimento de uma pessoa por outra. Mesmo assim, isso ocorre em uma fração de segundo. Uma pessoa simplesmente reconhece a outra. Como ela faz isso é um tema complexo e ainda em estudo. Como outro exemplo, tomemos o caso de um músico profissional. Tocar bem um violão requer prática. Dificilmente um músico sabe “como” ele toca o instrumento. Ele simplesmente o faz. Na verdade, é demonstrado que, uma vez solicitado para prestar atenção no movimento de seus dedos enquanto toca, o desempenho do músico piora. Melhor para ele é simplesmente “deixar fluir”. Por outro lado, quanto mais específica a indagação, mais facilmente ela é respondida, por exemplo “como você faz para produzir esse som mais abafado?”. O músico pode responder algo do tipo “ah, basta deixar os dedos menos pressionados contra o braço do violão”. Contudo, muitos podem contestar “Mas um músico profissional pode ensinar um estudante a tocar. Se e ele ensina, então ele sabe como faz”. Note que o instrutor dá dicas e demonstrações de como fazer. Resta ao estudante aprender o ofício em sua própria prática. O conhecimento tácito explica muitas facetas da ciência. Ele explica a dificuldade de replicação de certos experimentos, cuja realização envolve procedimentos práticos tais como processamento de amostras, construção de instrumentação dedicada etc. Há ainda outro aspecto relacionado com a questão do parágrafo inicial. Embora uma criança de sete anos já tenha uma boa noção do que são coisas vivas ou mortas no mundo que a cerca, ela o faz tacitamente. Os biólogos debatem até hoje sobre uma boa definição da vida. O mesmo ocorre com a energia. Até certo grau, todos possuem um conhecimento tácito sobre “o que é energia”, embora defini-la ainda seja um desafio. Note as manifestações específicas de energia são descritas pela ciência, e essa descrição é dependente do contexto, vem como o significado de cada termo das expressões matemáticas. Sobre isso, Polanyi escreve:

“...fórmulas não tem significado a não ser que se apoiem em experiências não matemáticas. Em outras palavras, nós podemos usar fórmulas somente depois de entendermos o mundo ao ponto

de fazermos perguntas sobre ele e ter estabelecido o suporte para as fórmulas nas experiências que elas se prestam a explicar. O raciocínio matemático sobre a experiência deve incluir, afora o achado e a formatação não matemática antecedente da experiência, a igualmente não matemática relação dos termos matemáticos para a tal experiência e a eventual, também não matemática, compreensão da experiência elucidada pela teoria matemática”.

É importante termos consciência da influência do conhecimento tácito na ciência². Mas isso não indica que devamos nos conformar com um conhecimento implícito. Esta forma de conhecimento estará sempre presente e é importante. Por outro lado, o progresso da ciência e da tecnologia está atrelado a capacidade que temos de expressar padrões naturais de forma explícita e analítica.

1.2 – Para saber mais

(em construção)

Questionário

1 - É comum encontrar a energia definida como “a capacidade de um sistema físico de realizar trabalho”. Você acha que é uma boa definição?

- a) Se você acha que não, justifique sua posição, desconstruindo a afirmação.
- b) Se você acha que sim, então defina trabalho, de forma a abarcar na definição, processos físicos que vão desde o “empurrar um carrinho de supermercado”, passando pela tensão elétrica entre os terminais de uma bateria, até a “ionização de um átomo”.
- c) Se você acha que depende, indique e justifique quando sim e quando não, no mesmo espírito dos itens (a) e (b).

2 – Carnot não considerava a hipótese de que o calórico e sua “lei de conservação” eram conceitos equivocados, temendo toda a ruína da ciência térmica da época. Porém novos experimentos fizeram que esses conceitos fossem abandonados. Outros conceitos tiveram uma obsolescência parecida, como o *vis viva*, a conservação de massa (de Lavoisier), o espaço e tempo absoluto (de Newton) e o éter (de Maxwell). Partindo desse histórico, o que você pode dizer sobre o conceito de “conservação de energia”? E a conservação de carga elétrica?

² Para saber mais sobre a influência dos aspectos “não matemáticos” e do contexto com relação às fórmulas e definições físicas, sugerimos a leitura da sessão 12-1 “O que é uma força?” do livro “Lições de Física de Feynman” do autor Richard Feynman.

3 – No tratamento informal, calor e energia térmica podem ser tratados como sinônimos. Estritamente falando, isso é um abuso de linguagem semelhante ao se tratar massa como peso. Explique a diferença entre calor, energia térmica e temperatura.