

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” onde ele declara que a “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 (Lord 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”, outros indivíduos já haviam proposto a lei de conservação de massa dos reagentes e produtos 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 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 Gottfried Wilhelm Leibniz no séc XVII 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. Dentro desse escopo, 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. Na sentença, está implícita a ideia de que as hipóteses antigas eram baseadas em tolices, e que as de hoje são hipóteses 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 Niels 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 à “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 Richard Feynman (que é um importante personagem na história da física), 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. Na discussão aqui não queremos demonstrar ou resolver equações, mas apenas destacar que a energia se apresenta em maneiras diferentes e que estas formas específicas são bem formalizadas. As formas mais comuns são ilustradas na Fig. 1.1:

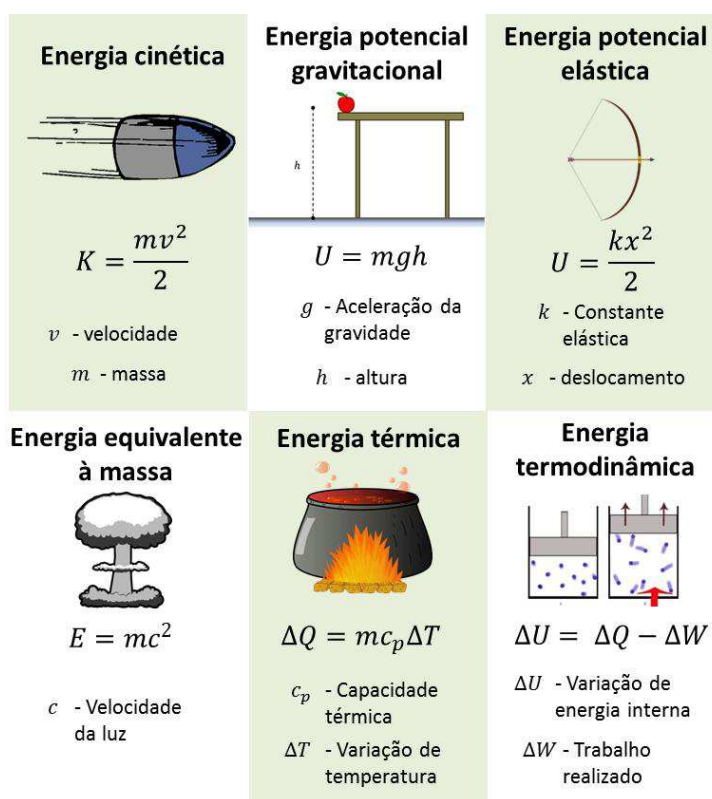


Fig. 1.1: Exemplos de tipos específicos de energia, onde podemos perceber que há uma formalização estabelecida. Essa formalização não existe para a energia como um conceito unificado e geral.

A famosa equação que relaciona massa e energia 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. Na época, o modelo cumpria o seu papel 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.

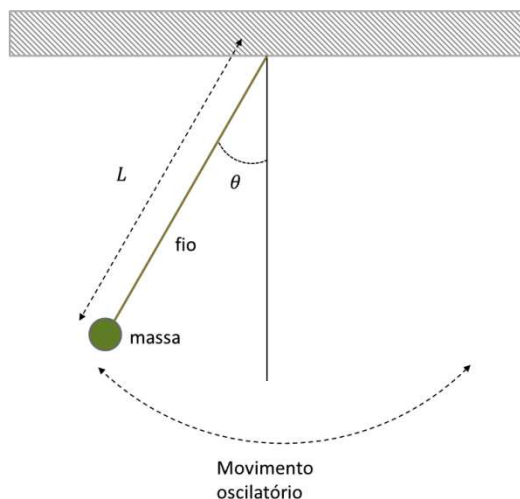


Figura 1.2: Diagrama esquemático de um pêndulo simples ilustrando um processo de conversão de energia.

Já Galileu, em sua famosa observação dos candelabros da catedral de Pisa no séc. XVI, 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 gravitacional e cinética (Fig. 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 verdadeiro 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 energia 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. Voltando aos exemplos ilustrados na Fig. 1.1, quando estudamos o problema de um arco que atira uma flecha, estamos mais preocupados com a energia potencial elástica e a energia cinética adquirida pela flecha. Quando estamos estudando o problema da queima da madeira, estamos preocupados com a energia química contida nela e no aumento de temperatura de um corpo devido à liberação dessa energia e eventualmente em um trabalho realizado. Em nenhum desses casos, estamos preocupados com a transformação de massa em energia. 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 os termos das expressões para energia cinética e termodinâmica 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 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 ciência¹. 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 à capacidade que temos de expressar padrões naturais de forma explícita e analítica.

1.2 – E se a energia pudesse ser definida?

Na seção anterior procuramos mostrar que a natureza da energia é um tema que permanece em debate e em progressão. Não há uma resposta definitiva sobre a questão do que é energia. Porém isso não impede que boa parte da comunidade científica defenda a ideia de que existe uma definição para energia e que ofereçam propostas.

Um aspecto razoavelmente consensual é o entendimento de que a energia se conserva e possui natureza discreta. A manifestação quantizada da energia é um dos pressupostos da física quântica, que é uma teoria que explica uma grande quantidade de fenômenos físicos. Além disso, há uma miríade de experimentos que corroboram os modelos implícitos nela. Porém, tendo em vista a discussão da seção anterior, mesmo que um modelo seja extensamente corroborado experimentalmente, temos que deixar a porta aberta para a obsolescência deste frente a outro mais adequado às evidências futuras.

Além da característica quantizada, o que mais podemos dizer sobre a energia? Deixemos de lado explicações comuns dos livros textos, que definem genericamente energia em termos de trabalho, para depois definir trabalho em termos de energia. Tal estratégia de definição circular só se justifica assumindo grande bagagem conceitual tácita. Devemos procurar encarar o assunto abertamente e procurar uma definição mais explícita para a energia.

E se alguém fizesse a seguinte proposta:

“A energia de um sistema pode sempre ser entendida como resultante de um trabalho realizado por uma força ao longo de um caminho.”

Definição
tentativa

A primeira vista é bastante razoável. Ao invés de simplesmente relacionar a energia ao trabalho de forma genérica, a definição tentativa procura estabelecer significado em termos de conceitos mais específicos como força e caminho. É a forma mais simples de entender o conceito de trabalho. Por exemplo, se eu empurro um carrinho de supermercado com uma força F ao longo de uma distância d , o trabalho W que realizo é dado por:

$$W = Fd \quad (1.1)$$

¹ 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.

De partida é fácil perceber como a definição tentativa abarca a energia armazenada em um arco e flecha, ou qualquer outro sistema massa mola. A energia armazenada é trabalho realizado pela força que aplicamos da corda do arco ao longo de toda a tração (caminho).

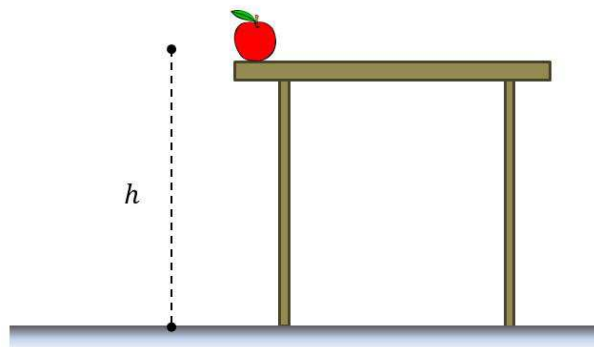


Fig. 1.3: A energia potencial gravitacional de uma maçã sobre a mesa pode ser entendida como resultante da ação de uma força ao longo de um caminho.

Também não é difícil perceber que a energia potencial gravitacional de um objeto, como por exemplo, uma maçã sobre uma mesa (Fig. 1.3), pode ser definida como resultado da ação de uma força por um caminho. Se a maçã está a uma altura h em relação ao solo, sabemos que a energia potencial gravitacional (U) é dada por:

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

onde m é a massa da maçã e g é a aceleração da gravidade (Fig. 1.1). Por outro lado, sabemos que a gravidade exerce uma força na maçã que chamamos de força peso (P) que é dada por:

$$P = mg \quad (1.3)$$

de forma que podemos reescrever a energia potencial gravitacional como

$$U = Ph \quad (1.4)$$

de onde podemos ver de forma evidente que a energia potencial gravitacional pode ser descrita como a resultante da ação da força peso ao longo do caminho da altura h . É interessante notar que podemos ter esse entendimento da energia potencial gravitacional da maçã, mesmo que a maçã tenha sido colocada sobre a mesa a partir de qualquer trajetória ou até mesmo um processo mais complexo², e não ter sido simplesmente apanhada do chão e colocada sobre a mesa passando pela trajetória que acompanha a linha tracejada da Fig. 1.3. Este é um exemplo da reputação que a física possui, e que está relacionada com o “poder explicativo” de seus modelos.

O que dizer da energia cinética então? A energia cinética de uma pessoa andando de bicicleta, por exemplo, pode ser entendida como resultante da ação de uma força ao longo de um caminho? De nossa experiência cotidiana sabemos que, para seguirmos em velocidade

² Mesmo que, ao invés de uma maçã, haja uma xícara de café sobre a mesa, sendo que a xícara tenha vindo do armário e o café do bule que estava na pia. Ainda assim, a energia potencial é dada pela massa total do conjunto xícara e café vezes a altura h .

constante, devemos pedalar continuamente. Isso porque lutamos contra a resistência do ar, o atrito com o solo, o atrito dos rolamentos etc. Como discutimos na seção anterior, essas forças dissipativas necessitam de um modelo físico sofisticado. Mas, como fazemos comumente em física, ainda podemos analisar a essência do problema desprezando tais fatores dissipativos. Vamos considerar o caso em que um ciclista trafega em um piso plano numa velocidade constante, onde desprezamos a influência de atritos e ele não está pedalandando. Nesse caso, podemos dizer que ele se movimenta por inércia. De onde vem sua energia? Se o terreno é plano, por experiência podemos dizer que, em algum momento anterior, o ciclista partiu do repouso e pedalou por um dado trecho até atingir a velocidade que observamos. Portanto, podemos dizer que a energia cinética que ele apresenta é resultado do trabalho de uma força ao longo de um caminho. Alguém poderia contestar dizendo que o movimento do ciclista poderia ter sido resultado, não de sua pedalada, mas de um processo de várias etapas, ou de um embalo obtido em uma ladeira próxima. Mesmo assim podemos fragmentar processo como a soma de etapas de trabalho e, no último caso, não é difícil de demonstrar que a energia cinética é resultado da ação de uma componente da força peso do conjunto ciclista e bicicleta ao longo da ladeira.



Fig. 1.4: A energia cinética como resultante de uma força ao longo de um caminho.

CC0 Public Domain - Atribuição não requerida - <https://pixabay.com/pt/bicicleta-moto-ciclismo-esporte-384566/>

Existem várias formas de se formalizar a relação entre energia cinética e trabalho em um caso como esse. Podemos partir da equação de Torricelli, que se trata de uma equação de cinemática estabelecida por Evangelista Torricelli no séc XVII, ou seja, muito antes do estabelecimento do conceito de energia como conhecemos hoje. Vamos utilizar a equação de Torricelli para analisarmos o trajeto em que o ciclista acelera, ou seja, a parte do trajeto onde ele sai do repouso e pedala até atingir a velocidade final que observamos mais adiante. A equação de Torricelli é dada por:

$$v_f^2 - v_i^2 = 2ad \quad (1.5)$$

Onde v_i e v_f são as velocidades inicial e final do processo respectivamente, a é a aceleração e d é a distância do trajeto em que o ciclista segue pedalando até atingir a velocidade final. Como o ciclista parte do repouso, a velocidade inicial é nula. Além disso, a

partir da segunda lei de Newton ($F = ma$) podemos deduzir que $a = F/m$. Substituindo na eq. 1.5:

$$v_f^2 = 2 \frac{F}{m} d \quad (1.6)$$

Rearranjando os termos, podemos escrever a eq. 1.6 da forma

$$\frac{mv_f^2}{2} = Fd \quad (1.7)$$

De onde mostramos que a energia cinética (Fig. 1.1) do ciclista equivale à ação de sua força na pedalada (F) ao longo do trajeto (caminho) d . Conclusões semelhantes podem ser obtidas para qualquer tipo de movimento, seja um carro, bola de boliche, projétil ou molécula. Além disso, o argumentamos que o caso onde o ciclista desce a ladeira sob a ação do campo gravitacional terrestre também pode ser analisado pelo mesmo princípio. Logo podemos usar esse princípio para movimentos causados por outros tipos de campo, como objetos atraídos por ímãs ou carregados eletricamente.

E o que podemos dizer sobre energia térmica? Aprendemos no ensino médio que “temperatura é o grau de agitação das moléculas”³. Logo, energia térmica é normalmente interpretada como movimento das moléculas. Sendo assim, recorrendo ao que acabamos de discutir sobre energia cinética, poderíamos interpretar energia térmica como sendo resultado de ação de forças moleculares sobre cada uma das partículas de um sistema.

Usando análises semelhantes, pode-se compreender a energia elétrica produzida como sendo resultado do trabalho realizado pela força (pressão no caso) do fluido de trabalho movimentando as turbinas das centrais geradoras. Sem entrar nos detalhes dessa análise, pois estudaremos as máquinas térmicas e geradores elétricos mais adiante, queremos apenas chamar a atenção de que tal correlação pode ser feita.

Dessa forma, progredimos bastante ao tentarmos compreender energia a partir da definição tentativa. Podemos entender ciclistas em movimento, carros, bolas de futebol, objetos quentes, a energia elétrica, maçãs sobre a mesa, barragens de hidrelétricas a cama elástica etc. Para muitos, isso indica que uma definição é possível. Mas existe um motivo para não haver consenso entre os cientistas. Como acontece regularmente na física, mesmo bons modelos podem deixar de funcionar quando se passa a analisar de uma forma mais minuciosa. Como já mencionamos, Feynman procurou discutir a dificuldade em definir o que é uma força⁴. Podemos também discutir as limitações do conceito de caminho ou trajetória. Nesse quesito, a definição tentativa esbarra em uma das teorias mais respeitadas da ciência: a física quântica. Segundo ela, na escala atômica, o conceito de trajetória deixa de ter sentido. O experimento mais clássico que corrobora isso é o experimento de dupla fenda. Porém ao invés de discutirmos esse experimento, podemos analisar uma situação mais simples: um fóton de luz viajando no espaço. Este fóton possui uma energia bem definida pela física quântica, e dada pela equação:

³ Discutiremos em mais detalhes sobre energia térmica no cap. 5.

⁴ Veja a nota de rodapé 1.

$$E_f = h\nu \quad (1.8)$$

onde h é a constante de Planck e ν é a frequência associada ao fóton. De onde vem a energia associada a este fóton? Como de costume, questões fundamentais em física quântica são complexas. Discutindo de forma simplificada e deixando outras questões de física moderna de lado (como fatores relativísticos), os fótons não são acelerados da mesma forma que pensamos do ponto de vista clássico, mas devemos dizer preferivelmente que os fótons “interagem”, principalmente por meio de processos de absorção e geração. Por exemplo, um fóton pode ser gerado a partir da fluorescência, ou seja, a partir da transição de um elétron que passa de um estado mais energético para um estado de menor energia. Ao estudarmos sobre o assunto, veremos que as energias são quantizadas e que não há uma trajetória bem definida em que o elétron possa realizar entre os estados de energia. Se assim fosse, feriria princípios básicos da física quântica. De forma análoga, as forças envolvidas em tais processos são difíceis de serem equacionadas da forma como trabalhamos classicamente. Conclusões semelhantes podem ser obtidas analisando outras interações, não só de fótons, mas de outros sistemas de nível atômico.

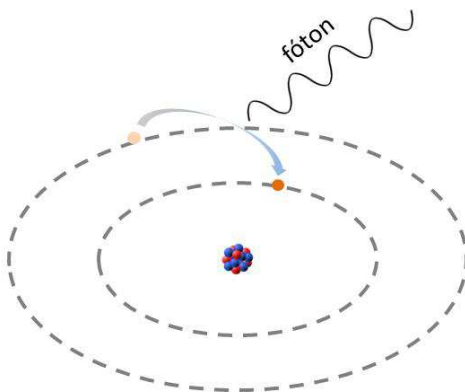


Fig. 1.4: Diagrama esquemático representando a geração de um fóton devido à transição entre estados eletrônicos de um átomo. Embora, representações como essa sejam comuns na literatura, onde os níveis energéticos são representados por meio de órbitas com trajetórias bem determinadas, é consenso de que se trata de um abuso diagramático, uma vez que os estados eletrônicos são mais acuradamente representados por orbitais atômicos. Além disso, também é consenso de que a transição do elétron de um nível para o outro não ocorre em uma trajetória bem definida como o diagrama dá a entender.

E você, leitor, tem uma proposta para definição de energia? Teste minuciosamente sua proposta. Há muito a se aprender nesse caminho.

Questionário

1 – 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 com que esse modelo fosse abandonado. 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 – 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.

3 – Da mesma forma que estabelecemos a relação entre o trabalho ao longo de um caminho e a energia cinética para o ciclista que atinge a velocidade final pedalando (eq. 1.5 a 1.7), demonstre que essa relação também vale para o ciclista que desce uma ladeira.

4 – Quando analisamos a energia cinética do ciclista, em um dado momento é dito: “Vamos considerar o caso em que um ciclista trafega em um piso plano numa velocidade constate, onde desprezamos a influência de atritos e ele não está pedalando.” A última informação é redundante. Por quê?

5 – Quando discutimos a definição tentativa para energia, vimos que ela esbarra no conceito de trajetória (ou caminho). Mencionamos que um dos experimentos que contesta o conceito clássico de trajetória é o experimento de fenda dupla de Young. O que é esse experimento e porque ele nos força a repensar o conceito de trajetória?