

Reflexões sobre o poder motriz do calor e sobre máquinas que servem para desenvolver esse poder

Sadi Carnot

É bem conhecido que o calor pode ser utilizado como causa do movimento, e que é muito grande o poder motriz que dele podemos obter. O motor a vapor, de uso comum hoje em dia, é uma prova clara deste fato. Podemos atribuir à ação do calor as enormes perturbações que vemos ocorrer na Terra: os movimentos da atmosfera, a elevação da neblina, a chuva e a queda de outros meteoros*, as correntes de água que correm por canais na terra, utilizadas em pequena parte pelo homem. O calor é a causa também das erupções vulcânicas e dos terremotos. É dessa grande fonte que retiramos a força motriz necessária para nosso uso. Ao disponibilizar material combustível por todo lado, a natureza nos oferece os meios de gerar calor e o poder motriz a ele associado, em todos os tempos e em todos os lugares, e é o motor a vapor que nos permite gerar e usar esse poder. Este estudo das máquinas a vapor é de máximo interesse, dada sua importância e uso crescente, e as grandes mudanças que estão destinadas a produzir no mundo civilizado. [É do calor] que se desenvolveram as minas, os navios com propulsão, a dragagem dos rios e baías. É ele que forja o ferro, corta madeira, mói o grão, tece os fios e transporta os pesos mais pesados. No futuro, é provável que se torne o motor universal, e que substitua a potência que obtemos dos animais, das quedas d'água e das correntes de ar.

.....

O motor a vapor prestou um serviço inestimável à Inglaterra, pois reviveu a exploração das minas de carvão, que estavam à míngua e em perigo de extinção, devido às dificuldades crescentes associadas à escavação e extração do carvão**. Em segundo lugar, entre os serviços prestados pela máquina a vapor, eu colocaria a produção de ferro, que aumentou muito tanto pela oferta abundante de carvão - este tomou o lugar da madeira, cujo estoque se exauria, quanto pelas máquinas de vários tipos que o uso do vapor tornou possível utilizar.

Como todos sabem, o ferro e o fogo constituem a base das artes mecânica. É provável que não se encontre na Inglaterra uma única indústria que não dependa destes

*Antigamente, todo fenômeno atmosférico era chamado de meteoro.

**Podemos afirmar que a mineração do carvão aumentou 10 vezes, desde a invenção da máquina a vapor. A de cobre, latão e ferro aumentou do mesmo tanto. O que aconteceu há meio século na Inglaterra, está se repetindo nas minas de prata e ouro do Novo Mundo....

agentes e que não os utilize de forma extensiva. Se a Inglaterra hoje perdesse todas as suas máquinas a vapor, ela perderia também todo o seu carvão e ferro, e essa perda secaria todas as suas fontes de riqueza e destruiria sua prosperidade; aniquilaria seu poder colossal. A destruição de sua marinha, considerada [pela Inglaterra] sua base principal, talvez fosse menos fatal. A navegação segura e rápida garantida pelos navios a vapor é uma arte completamente nova, devida aos motores a vapor. Essa arte permitiu estabelecer a comunicação regular e rápida pelos mares, como também ao longo dos grandes rios tanto dos antigos quanto dos novos continentes. Com o motor a vapor foi possível atravessar regiões ainda selvagens que teria sido impossível alcançar há bem pouco tempo. Os produtos da civilização foram levados a todos os cantos da Terra, ... De alguma maneira, a navegação permitida pelo motor a vapor aproximou as nações mais distantes. Ela tende a unir os povos da Terra como se todos vivessem no mesmo país. ... A descoberta do motor a vapor, assim como a maioria das invenções humanas, é o resultado de diferentes tentativas simplórias atribuídas a várias pessoas, e um único responsável é desconhecido. A descoberta principal está muito mais nos melhoramentos sucessivos [da máquina a vapor] que a levaram à perfeição, do que nas primeiras tentativas. A diferença entre as primeiras estruturas nas quais foi utilizada a força expansiva e a máquina atual é quase tão grande quanto a diferença entre a primeira jangada construída e uma belonave (navio de guerra).

Não podemos negar à Inglaterra a honra pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento desta descoberta: Savery, Newcomen, Smeaton, o célebre Watt, Woolf, Trevithick e outros engenheiros ingleses são os verdadeiros inventores do motor a vapor. Foi de suas mãos que surgiu cada um dos aperfeiçoamentos. É natural que a invenção, a melhoria e o aperfeiçoamento aconteçam no lugar onde são mais necessárias.

Apesar de todo o investimento feito na máquina a vapor, e apesar do estado de perfeição que atingiu, a teoria da máquina térmica avançou muito pouco, e as tentativas para melhorar esse estado de coisas tem sido empreendido de forma quase aleatória.

Se existe ou não existe um limite para o poder motriz* do calor é uma questão frequentemente levantada; se há um limite para o aperfeiçoamento da máquina a vapor que não pode ser ultrapassado de maneira nenhuma; ou, se, ao

* A expressão poder motor é usada no sentido de efeito útil que um motor é capaz de produzir. Esse efeito pode sempre ser medido em termos da elevação de um peso através de uma certa distância; é sabido que a medida corresponde ao produto do peso pela altura para qual este é levado.

contrário, é possível estender indefinidamente os aperfeiçoamentos. Os inventores procuram há muito tempo um agente mais eficiente do que a água na produção de poder motriz do calor; seria o ar mais vantajoso, nesse quesito. Nos propomos a examinar estas questões criticamente.

O fenômeno da produção de movimento pelo calor não foi ainda analisada sob um ponto de vista suficientemente geral. [O problema] foi tratado apenas em relação a máquinas cuja natureza e modo de ação impedem uma investigação completa. Nestas máquinas, o fenômeno é em certa medida imperfeito e incompleto. Torna-se difícil reconhecer seus princípios de funcionamento e estudar suas leis. Para que o princípio da produção de movimento pelo calor seja examinado em toda a sua generalidade, precisamos imaginar essa produção de forma independente de mecanismos particulares ou de agentes particulares. É preciso estabelecer provas que sejam aplicáveis não apenas à máquina a vapor, mas a qualquer outra máquina de calor*, independente de sua substância de trabalho ou seu modo de funcionamento.

As máquinas que não operam com calor, como as máquinas operadas por homens ou animais, a partir de queda de água ou por meio de correntes de ar, por exemplo, podem ser estudadas em detalhe através dos princípios da mecânica... A teoria destas máquinas está completa. Mas não há uma teoria equivalente para as máquinas de calor. E essa teoria continuará ausente, até que as leis da física sejam estendidas e generalizadas de forma que possamos prever todos os efeitos do calor sobre qualquer corpo que seja.

Vamos supor que o leitor tenha conhecimento, ainda que superficial, sobre as várias partes que compõem uma máquina a vapor comum. Pensamos que é desnecessário descrever a fornalha, a caldeira, o tubo de vapor, o pistão, o condensador, etc. A produção de movimento no motor a vapor é sempre acompanhada de uma circunstância que é muito importante notar. Essa circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico**, ou seja, sua passagem de um corpo de temperatura mais elevada para outro onde esta [temperatura] é mais baixa. O que é que acontece, de fato, quando o motor a vapor está em funcionamento? O calórico liberado na fornalha, como resultado da combustão, passa através da parede da caldeira e produz vapor, sendo incorporado de alguma forma a esse vapor. Carregando o calórico, o vapor o transporta [o calórico] primeiro para o

* Fazemos uma distinção entre a máquina a vapor e a máquina a calor em geral, que pode utilizar qualquer outro agente, e não apenas a água, para obter o poder motriz do calor

**[O calórico é tido como uma substância indestrutível. O termo é usado por Carnot com o mesmo significado que fogo ou calor. Nota do tradutor para o ingles.]

cilindro, onde preenche alguma função, e depois para o condensador, onde o vapor se precipita, ao entrar em contato com a água fria. O resultado final é que a água fria do condensador recebe o calórico liberado na combustão. A água [fria] é aquecida pelo vapor, como se tivesse sido colocada diretamente sobre a fornalha. O vapor é unicamente um meio de transportar o calórico: assim, ele desempenha o mesmo papel que tem no aquecimento dos banhos por vapor, muito embora neste caso [da máquina], seu movimento tenha utilidade.

Na operação que acabamos de descrever, podemos perceber facilmente que ocorre o restabelecimento do equilíbrio no calórico e a passagem de um corpo mais quente para um corpo mais frio. O primeiro corpo [quente] é o gás aquecido da fornalha; o segundo corpo [frio] é a água de condensação. O equilíbrio do calórico é restabelecido, se não completamente, pelo menos em parte. Por um lado, o ar aquecido, tendo feito o seu trabalho, escapa pela válvula a uma temperatura muito menor do que a que tinha atingido na combustão; por outro lado, a água do condensador, depois de condensar o vapor, deixa o motor com uma temperatura maior do que a que tinha quando entrou na máquina. A produção da potência motriz na máquina a vapor ocorre, não por um consumo real de calórico, mas devido a **uma transferência de calor de um corpo mais quente para um corpo mais frio**, ou seja, a partir do restabelecimento de seu equilíbrio [do calórico] que supomos seja rompido por uma ação química, como a combustão, ou por qualquer outra causa. Veremos, em breve, que este princípio é aplicável a todas as máquinas que são operadas com o calor.

De acordo com este princípio, para obter a potência motriz não é suficiente produzir calor; é necessário termos, também, o frio, sem o qual o calor é inútil. Pois se existissem apenas corpos quentes como nossas fornalhas, como seria possível condensar o vapor, e para onde iria, depois de produzido?

Não podemos responder que o vapor deveria ser ejetado para a atmosfera, como se faz com algumas máquinas*, pois a atmosfera não o receberia. No atual estado de coisas, a atmosfera age como um grande condensador para o vapor, porque está [a atmosfera] a uma temperatura mais baixa; não fosse assim, ela se saturaria rapidamente, ou poderia até estar já saturada de início**.

*Algumas máquinas de alta pressão ejetam o vapor diretamente para a atmosfera, ao invés de condensá-lo. Estas máquinas são utilizadas principalmente em lugares onde é difícil encontrar correntes de água fria capazes de efetuar a condensação.

**É imprescindível que a água exista no estado líquido, já que ela é necessária para suprir a máquina a vapor - isto [existência da água no estado líquido] requer que a pressão [atmosférica] seja capaz de impedir sua evaporação, portanto que a pressão seja igual ou maior que a tensão de vapor na temperatura da água... Se a temperatura na

Sempre que há uma diferença de temperatura, e que o restabelecimento do equilíbrio do calórico pode acontecer, a produção de potência motriz é possível. O vapor é apenas um agente que permite obter esta potência, mas não é o único; qualquer corpo natural podem ser usado com o mesmo objetivo, pois todo corpo natural é suscetível a variações de volume, a sucessivas contrações e dilatações provocadas pela alternância de calor e frio; através de variações de volume são capazes de superar resistências e, portanto, de produzir potência motriz. Um corpo sólido, como uma barra metálica [por exemplo], aumenta e diminui de tamanho, se é aquecida e resfriada alternadamente, e pode [assim] movimentar corpos presos às suas extremidades. Um líquido que seja alternadamente aquecido e resfriado aumenta e diminui de volume, e pode vencer obstáculos maiores ou menores que se oponham à sua expansão. Um fluido aeriforme sofre variações consideráveis de volume, sob variações de temperatura; se for encerrado em um envelope capaz de dilatação, como um cilindro provido de um pistão, pode produzir movimentos muito grandes. Os vapores de todos os corpos capazes de evaporação, como o álcool, o mercúrio, o enxofre, etc, podem desempenhar a mesma função que a água desempenha.

....

Podemos concluir que a potência motriz máxima que resulta do uso do vapor é também a máxima potência motriz que podemos extrair por qualquer outro meio.

....

Como podemos saber que esse máximo foi alcançado, e que o vapor foi utilizado da forma mais vantajosa possível para a produção de poder motriz?

Como todo restabelecimento do equilíbrio do calórico pode ser usado para produzir potência motora, todo restabelecimento do equilíbrio que ocorre sem produção de potência motriz pode ser considerado uma perda: com uma pequena reflexão, podemos perceber que toda mudança de temperatura que não seja devida a uma mudança de volume do corpo corresponde apenas a um restabelecimento inútil de equilíbrio do calórico.* A condição necessária para o máximo é, então, **que não ocorra nenhuma mudança de temperatura nos corpos utilizados para obter potência motora que não seja devida à mudança de volume.** Portanto,

superfície da Terra fosse muito alta, como é, com certeza, em seu interior, toda a água do oceano estaria na forma de vapor na atmosfera, e não haveria água no estado líquido.

*A ação química entre os corpos usados para obter a potência motora do calor não está sendo considerada aqui. A ação química que ocorre na fonte é preliminar, de certa maneira, pois não é uma ação proposta para a criação imediata de potência motriz, mas sim para destruir o equilíbrio no calórico, para produzir uma diferença de temperatura que finalmente resultará em movimento.

toda vez que essa condição é satisfeita, o máximo é atingido. Esse princípio não pode ser esquecido na construção de máquinas movidas a calor. Este é o fundamento de seu funcionamento. Se [este] não puder ser obedecido rigorosamente, deve-se manter tão próximo quanto possível dele.

.....

De acordo com a visão atual, é adequado comparar o poder motor do calor com o [poder] de uma queda de água; ambos possuem um limite que não pode ser ultrapassado de maneira alguma, qualquer que seja a máquina desenhada para receber a ação da água, por um lado, e, por outro, qualquer que seja a substância escolhida para receber a ação do calor. A potência motora da água em queda depende da quantidade de água e da altura de sua queda; a potência motora do calor depende da quantidade de calórico empregada e aquilo que podemos chamar e que iremos chamar de sua descida*, isto é, a diferença de temperatura entre os corpos entre os quais ocorre a troca de calórico. Na queda d'água, a potência motriz é estritamente proporcional à diferença de nível entre os reservatórios superior e inferior. Na queda do calórico, o poder motor certamente aumenta com a diferença de temperatura entre o corpo mais quente e o corpo mais frio, mas não sabemos se é proporcional a essa diferença. Não sabemos, por exemplo, se a queda do calórico de 100 para 50 graus produz mais ou menos potência motriz do que a queda do mesmo calórico de 50 para zero graus. Essa questão vamos examinar mais tarde.

.....

*O assunto tratado aqui é inteiramente novo, de modo que somos obrigados a utilizar expressões novas, e que por isso podem não ser tão claras como desejaríamos.