



Uma releitura de Sadi Carnot no ano do bicentenário da Termodinâmica

A rereading of Sadi Carnot in the bicentenary year of thermodynamics

Agamenon R. E. OLIVEIRA

Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro

agamenon.oliveira@gmail.com

Abstract. *Sadi Carnot entered the Paris Polytechnic School at a very young age. Having been born in 1796, in 1812 he entered that renowned educational institution. As a military engineer, he followed some actions of the French army, but it was the period of peace after Waterloo that provided the development of his talent for engineering disciplines. He studied mainly physics and economics, spending much of his time visiting industries and studying industrial organization and economics, having become an expert on trade and industry issues in several European countries. The most finished product of his studies was the publication, in 1824, of a small book, 118 pages long, entitled: *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. The aforementioned work by Carnot, inaugurating the science of thermodynamics, lays the foundations and philosophical foundations for changing several paradigms already established in the sciences of the 19th century. Thermodynamics immediately presents itself as a new theory of machines, providing a solution and extending the limits imposed by Newtonian theory to explain machines, because energy degradation. In this work we will read some selected excerpts from his greatest work, highlighting the importance of the study of thermal machines for industrial development.*

Keywords: *Industrial Revolution. Thermodynamics History. Entropy Concept. Changes of Paradigm.*

Resumo. Sadi Carnot ingressou na Escola Politécnica de Paris muito jovem. Tendo nascido em 1796, em 1812 ingressou naquela conceituada instituição de ensino. Como engenheiro militar, acompanhou algumas ações do exército francês, mas foi o período de paz após Waterloo que proporcionou o desenvolvimento de seu talento para as disciplinas de engenharia. Estudou principalmente física e economia, passando grande parte do seu tempo visitando indústrias e estudando organização industrial e economia, tendo-se tornado um especialista em questões comerciais e industriais em vários países europeus. O produto mais acabado de seus estudos foi



a publicação, em 1824, de um pequeno livro, de 118 páginas, intitulado: *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. A referida obra de Carnot, inaugurando a ciência da Termodinâmica, lança as bases e fundamentos filosóficos para a mudança de vários paradigmas já estabelecidos nas ciências do século XIX. A Termodinâmica apresenta-se imediatamente como uma nova teoria das máquinas, fornecendo uma solução e ampliando os limites impostos pela teoria newtoniana para explicar as máquinas, devido à degradação da energia. Neste trabalho faremos uma leitura de alguns trechos selecionados de sua obra máxima ressaltando a importância do estudo das máquinas térmicas para o desenvolvimento industrial.

Palavras-chave: Revolução Industrial. História da Termodinâmica. Conceito de Entropia. Mudanças de Paradigma.

Recebido: 28/09/2024 Aceito: 05/04/2025 Publicado: 01/06/2025

DOI:10.51919/revista_sh.v1i0.e490

1. Introdução

Nas primeiras décadas do século XIX, com o desenvolvimento de novas teorias para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos, a propagação da luz e do calor, o paradigma newtoniano começou a perder importância como base de explicação para estes novos campos científicos. Os engenheiros politécnicos tentaram estender as ideias de Isaac Newton (1643-1727) para construir uma teoria para a mecânica aplicada, e, para isto, aplicaram o conceito de trabalho mecânico como forma de estabelecer comparações entre as máquinas, fossem elas semelhantes ou não. Mesmo levando às últimas consequências o paradigma newtoniano, mesmo assim este movimento foi incapaz de dar conta de uma ciência das máquinas, porque em seu processo de operação a energia envolvida se degrada. Neste contexto é que surge uma nova teoria para as máquinas: a Termodinâmica.

O propósito básico e fundamental de Sadi Carnot (1796-1832) ao estudar o calor como forma de movimento foi explorar todas as suas potencialidades e aplicações às máquinas, apropriar-se dele e colocá-lo a serviço das necessidades humanas, num contexto em que a Inglaterra já tinha tomado um grande impulso em sua Revolução Industrial.

A retomada das relações econômicas entre a França e a Inglaterra no período denominado “Restauração” mostrou aos franceses o predomínio da indústria inglesa sobre a sua. Isso se deveu em grande parte ao progresso e ao uso de máquinas a vapor constantemente aprimoradas pelos engenheiros ingleses. Sadi Carnot (Fig. 1) tinha plena consciência desta situação quando afirmou na sua maior obra:

O estudo destas máquinas é do maior interesse, a sua importância é imensa, a sua utilização cresce a cada dia. Parecem destinados a produzir uma grande revolução no mundo civilizado... Provavelmente também servirão um dia como motor universal e terão

preferência sobre a força dos animais, das cachoeiras e das correntes de ar. (Carnot, 1824, p. 2)

Estas previsões feitas por Carnot de fato se concretizaram e a máquina à vapor passou a ocupar em grande escala o cenário industrial, inicialmente na Inglaterra, mas logo em seguida difundindo-se pelos demais países europeus e nos Estados Unidos. Nos quarenta anos que se seguiram a publicação do trabalho de Carnot, a Termodinâmica sofreu grandes desenvolvimentos até tornar-se uma ciência mais geral e uma ciência do calor, ganhando uma abrangência insuspeitada tendo estabelecido conexões com a economia e as ciências da vida através do conceito de entropia.

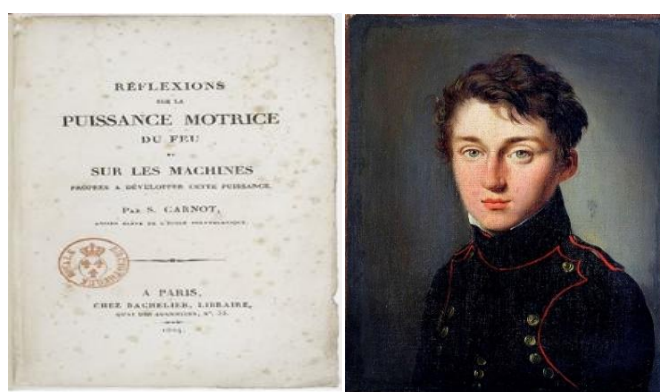


Figura 1. À esquerda, a obra de Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, conforme lançada em 1824. À direita, Sadi Carnot retratado por Louis Léopold Boilly (1753-1823), disponível em domínio público.

Fonte:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot#/media/Ficheiro:Sadi_Carnot.jpeg

Relendo as “Reflexões” de Carnot – Em seguida utilizaremos algumas passagens do livro de Carnot, agregando alguns comentários para ressaltar a importância que este trabalho revolucionário teve, para a ciência das máquinas, embora, de início, ele tenha passado despercebido da comunidade científica da época.

A produção de movimento está sempre presente nas máquinas a vapor, o que também é acompanhado por uma circunstância na qual devemos focar..... a passagem de calor de um corpo onde a temperatura é maior ou menor, para outro onde a temperatura é mais baixa. O vapor nada mais é do que um meio de transporte de calor... a produção de força motriz deve-se, portanto, nas máquinas a vapor, não a um consumo real de calor, mas ao seu transporte de um corpo quente para um corpo frio. Este princípio é aplicável a toda máquina acionada por calor, podendo haver também produção de força motriz. (Carnot, 1824, p. 9, 10, 11)

Como podemos observar da citação acima, embora naquela época prevalecesse a teoria do calórico, como um fluido que transportava o calor, Carnot não o menciona nem dá importância a este fato, mas sim ao transporte de calor de um corpo quente para um menos quente ou mesmo

frio. Dessa forma, as transformações que realizam trabalho ocorrem nesta direção do corpo quente para o corpo frio e não podemos reverter o processo, ou seja sair de um estado no qual teríamos uma temperatura mais baixa e passarmos para a mais alta a não ser que fosse injetada mais energia no sistema. Além disso, depois com a definição de entropia a questão da disponibilidade de energia vai se apresentar como uma questão central e que entra no cômputo da própria entropia.

A força motriz máxima resultante da utilização do vapor é também a força motriz máxima alcançável por qualquer outro meio. Mas o que queremos dizer com máximo? A condição necessária do máximo é que não haja alteração no volume do corpo utilizado para realizar a força motriz do calor. Qualquer mudança de temperatura que não seja devida a uma mudança de volume, ou a uma ação química, é necessariamente devida à passagem direta do calórico, de um corpo menos quente para um corpo mais frio. Essa passagem ocorre principalmente quando corpos de diferentes temperaturas entram em contato... contatos semelhantes também devem ser evitados sempre que possível. (Carnot, 1824, p.23,24)

A questão levantada por Carnot da força motriz máxima está relacionada a capacidade que toda máquina tem de realizar trabalho na unidade de tempo, ou seja, a sua potência mecânica. Qualquer que seja o meio utilizado toda máquina está limitada pela diferença de temperaturas a fornecer uma potência máxima. Nesta citação ele se refere diretamente ao calórico como a substância responsável pela transferência de calor.

A água utilizada para produzir vapor à temperatura do corpo A está no final da operação à temperatura do corpo B, onde arrefeceu. Se quisermos recomeçar uma operação semelhante à primeira, se quisermos desenvolver uma nova quantidade de força motriz com o mesmo vapor, é necessário restaurar as coisas ao seu estado primitivo, e é necessário levar a água ao mesmo estado e grau de temperatura como antes. Isso pode ser feito, sem dúvida, restabelecendo imediatamente o contato com o corpo A: mas agora temos contato com corpos com temperaturas diferentes e perda de força motriz: impossibilitando a operação inversa. (Carnot, 1824, p.25,26)

Carnot trata agora da questão da irreversibilidade dos processos termodinâmicos, problema fundamental e que mais tarde seria caracterizado com a definição de entropia e que funciona como um índice que também indica a disponibilidade de energia em um determinado processo, referido a seu grau de temperatura absoluta. Tudo isto porque nas transformações que ocorrem nos sistemas a energia se degrada, ou seja parte se torna indisponível e parte se transforma em calor devido ao atrito entre suas partes móveis e, também indisponíveis.

A força motriz do calor independe dos agentes acionados para obtê-lo; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos entre os quais se consegue o resultado final, que é o transporte de calor. Enquanto um gás é comprimido rapidamente, sua temperatura aumenta, ela cai, desde que se expanda rapidamente. Estes são fatos que podemos concluir pela experiência. Uma massa de ar é comprimida em um cilindro de capacidade variável. Seu estado é sempre definido por seu volume, pressão e temperatura. Submetemo-lo então a uma série de transformações movendo o pistão no cilindro, que ao retornar ao seu estado inicial: teremos então descrito um ciclo.

Carnot repete algumas observações feitas anteriormente, mas ressalta o caráter cíclico do funcionamento das máquinas térmicas. Como é bem conhecido de todos, o ciclo de Carnot num diagrama $p \times v$, ou seja, pressão *versus* temperatura, é constituído por duas curvas isotérmicas e duas adiabáticas. Este diagrama também é importante porque, nele, a área líquida fornece a energia envolvida no processo de operação.

2. A definição de entropia

O segundo princípio da Termodinâmica trata de fenômenos físicos irreversíveis e, para tanto, é necessário introduzir uma nova função Termodinâmica que caracterize o grau de irreversibilidade. Esta função será chamada de entropia (Cardwell, 1971).

Uma transformação sofrida por um determinado sistema pode ser reversível, quando podemos reverter sua direção através de uma modificação infinitamente pequena de parâmetros externos que variam continuamente. O sistema terá uma série de estados de equilíbrio infinitamente vizinhos. A irreversibilidade dos sistemas pode ser devida aos seguintes fatores:

- Fricção
- Fenômenos de difusão (dois gases em contato)
- Trocas de calor, por exemplo, dois sistemas em contato em temperaturas diferentes, com um fluxo de calor fluindo do sistema mais quente para o mais frio
- Reação química

Se o ciclo for reversível, significa que todas as transformações se compensam e então temos como:

$$\int dQ/T=0$$

Por outro lado, se o ciclo se completar de forma irreversível, teremos necessariamente:

$$\int dQ/T>0$$

e as transformações negativas e positivas não se compensam.

3. As mudanças de paradigma provocadas pela Termodinâmica

O surgimento da Termodinâmica provocou uma mudança profunda na física de então, onde a maioria dos fenômenos físicos eram explicados pela mecânica newtoniana. Nessa época além da Termodinâmica surgem outros fenômenos que também fogem a explicação dentro do quadro conceitual newtoniano. Estes novos desenvolvimentos científicos estabeleceram os limites de aplicação da mecânica newtoniana e possibilitaram o surgimento e o desenvolvimento de outras

disciplinas científicas que iriam culminar com a descoberta da primeira da Termodinâmica: a lei da conservação da energia em meados do século XIX.

Uma outra mudança significativa de paradigma e que passa quase despercebida pelos historiadores é o método analítico (científico) utilizado por Carnot. Se observarmos o trabalho de Fourier que surge na mesma época ele utiliza a matemática, principalmente o cálculo diferencial e integral muito ao gosto do pensamento racionalista do século XVIII, como é o caso de d'Alembert, Johnn e Daniel Bernoulli. Se observarmos o trabalho de Carnot podemos constatar que sua forma e estilo são completamente diferentes dos trabalhos dessa época, constituindo-se, com este fato uma quebra de paradigma inicial do trabalho de Carnot.

Mais de dois séculos depois, ou seja, na década de 70 do século XX, devido a desenvolvimentos posteriores a 1824, principalmente com a introdução do conceito de entropia, o trabalho de Carnot passou a influenciar uma corrente de economistas que quebrou mais um paradigma, estabelecendo um elo importante entre a segunda lei da Termodinâmica e a economia, criando-se assim uma bioeconomia. É importante ressaltar que um movimento ecologista, embora com outras características já existiam e debatiam os problemas relacionados com o meio ambiente sem que concordassem inteiramente com Georgescu-Roengen (1906-1994), muito menos com sua teoria do de crescimento econômico (Georgescu-Roegen, 1971). No entanto, os trabalhos de Georgescu vieram aprofundar ainda mais os debates dessa área.

4. Conclusões

No ano de 2024 comemoramos o bicentenário da Termodinâmica. Tendo em vista que o campo revolucionou todo o panorama científico do século XIX, debruçar-se sobre seu enorme legado é a melhor forma de celebrarmos as contribuições de Carnot. Este estudo cumpre uma apresentação muito resumida e superficial da História da Termodinâmica, propondo a leitura de algumas passagens das *Reflexões* de Carnot que resultaram numa mudança conceitual no estudo das máquinas. Lembra também que alguns paradigmas importantes foram ultrapassados pela enorme quebra de paradigma que a emergência da Termodinâmica propiciou.

Referências

- Carnot, Sadi. **Réflexions sur la puissance motrice du feu**. Source Gallica.bnf.fr/Bibliothèque Nationale de France, Paris, 1824.
- Cardwell, Donald Stephen Lowell. **From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age**. Cornell University Press, New York, USA, 1971.
- Coelho, Ricardo Lopes. On Joule's paddle wheel experiments in textbooks. **Phys. Educ.**, v. 59, 2024.

Dhombres, Jean G.; Robert, Jean-Bernard. **Fourier**: createur de Physique-Mathématique. BELIN, Paris, 1998.

Fourier, Joseph. **Théorie Analytique de la Chaleur**. Éditions Jacques Gabay, Paris. France, 1822.

Georgescu-Roegen, N. **The Entropy Law and the Economic Process**. Harvard University Press, Cambridge, 1971. <http://dx.doi.org/10.4159/harvard.9780674281653>.

Gillispie, Charles C.; Pisano, Raffaele. **Lazare and Sadi Carnot**: A Scientific Filial Relationship. 2nd. Edition, Springer, 2014.

Oliveira, Agamenon R. E. History of Two Fundamental Principles of Physics: Least Action and Conservation of Energy. **AHS Journal**, no. 3, pp. 83-92, 2014.

Young, John. Heat, work and subtle fluids: a commentary on Joule (1850) “On the mechanical equivalent of heat”. **Phil. Trans. R. Soc. A**, v. 373: 2014.0348, 2015.