



e-Boletim de Física

International Centre for Condensed Matter Physics

Instituto de Física, Universidade de Brasília

Ano III, Junho de 2014 • <http://www.boletimdafisica.com/> • eBFIS 3 006-1(2014)

190 Anos do Ciclo de Carnot (190 Years of the Carnot Cycle)

Cássio C. Laranjeiras*

Instituto de Física, Universidade de Brasília, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

O objetivo deste artigo é registrar a passagem dos 190 anos do “Ciclo de Carnot”, proposto pelo físico e engenheiro francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) em sua obra “Reflexões Sobre a Potencia Motriz do Fogo e Sobre as Máquinas Adequadas para Desenvolver esta Potência” (1824). A obra, primeiro e único trabalho científico publicado por Carnot, é peça fundacional da Termodinâmica.

Palavras-chave: Sadi Carnot; Ciclo de Carnot; Termodinâmica.

The purpose of this paper is to mark the 190 years of the “Carnot Cycle”, proposed by the French physicist and engineer Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) in this memoir “Reflections on the Motive Power of Fire, and on Machines Fitted to Develop that Power” (1824). This was his first and only scientific work and a foundational one in thermodynamics.

Keywords: Sadi Carnot; The Carnot Cycle; Thermodynamics.

I. INTRODUÇÃO

Em 12 de junho de 1824, portanto há 190 anos, o físico e engenheiro francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), na época com 28 anos de idade, publicou uma monografia, seu primeiro e único trabalho científico, com o sugestivo título “Réflexions Sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes a Développer Cette Puissance” (Reflexões Sobre a Potencia Motriz do Fogo e Sobre as Máquinas Adequadas para Desenvolver esta Potência).

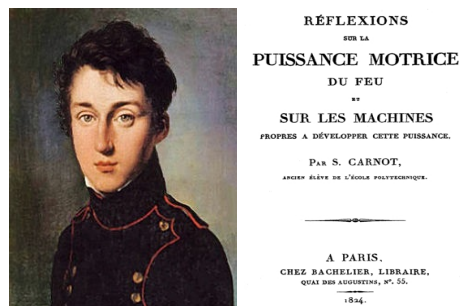


Figura 1: À esquerda, Sadi Carnot com o uniforme de estudante da École Polytechnique (Paris). À direita, o fac-símile do frontispício da primeira edição de suas “Réflexions” (1824).

Embora tenha inicialmente despertado pouca atenção de seus contemporâneos, que o consideraram como um tratado de filosofia natural de caráter meramente descritivo, o trabalho viria a se transformar na grande fonte de inspiração da termodinâmica moderna, ocupando lugar central no desenvolvimento teórico da ciência do calor.

Os problemas relacionados às técnicas de construção das *máquinas térmicas* (ou *máquinas de fogo*, como eram chamadas na época), já amplamente utilizadas no final do século XVIII, eram muito diferentes daqueles que se apresentavam no campo científico.

Sadi Carnot tomou como ponto de partida um domínio que aparentemente correspondia aos engenheiros de sua

* Cássio C. Laranjeiras é Professor Adjunto na UnB, orientador no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências/UnB e membro do Grupo de Ensino de Física do Instituto de Física - GEFIS/UnB; cassio@unb.br

época, para fazer uma incursão no campo da ciência. O que o homem havia construído para outros usos servia agora de ferramenta para uma análise dos fenômenos físicos.

Foi em “*Reflexões Sobre a Potencia Motriz do Fogo*” que Carnot enunciou o princípio segundo o qual o funcionamento das máquinas térmicas consiste no transporte de calor (calórico) [1] de uma fonte quente para uma fonte fria.

Desvendando os princípios do funcionamento da máquina térmica inventada (na verdade um aperfeiçoamento de modelos anteriores) por James Watt por volta de 1770, ele foi capaz de compreender *como e porquê* a máquina faz o que faz [2, p.228-229].

Carnot descreveu uma máquina ideal, cujo ciclo completo de funcionamento se dava de modo que a substância utilizada em sua operação - vapor, gás ou outra qualquer - é levada de volta a seu estado inicial, indicando assim, a independência da chamada Potência Motriz do Fogo (calor) com relação aos agentes de operação da máquina e sua dependência exclusiva das temperaturas das fontes de calor envolvidas. Nascia assim, o famoso **Ciclo de Carnot**.

A NECESSIDADE DE ESTUDOS TEÓRICOS DAS MÁQUINAS TÉRMICAS NO SEC. XIX

O início do século XIX na Europa assistia perplexo ao desenvolvimento técnico envolvido no aperfeiçoamento e difusão das chamadas *máquinas de fogo* (máquinas térmicas), idealizadas na segunda metade do século XVIII e em pleno funcionamento em finais desse mesmo século. A Inglaterra foi a grande protagonista desse processo, que viria a se constituir no grande motor da chamada Revolução Industrial e cujas origens remontam a nomes como Thomas Savery (1650-1715), Thomas Newcomen (1663-1729), John Smeaton (1724-1792) e James Watt (1736-1819), todos eles engenheiros e inventores; além de uma grande coletividade de artesãos e técnicos, que tiveram que superar inúmeros problemas na construção dessas máquinas.

Em meio a toda essa efervescência tecnológica, vamos encontrar no continente, sobretudo na França, uma maior preocupação com explicações de natureza teórica, especialmente relacionadas ao rendimento das máquinas. James Watt, nome legendário na Revolução Industrial, havia conseguido quadruplicar o rendimento da máquina de Newcomen, um dos primeiros modelos de máquina térmica, simplesmente separando a caldeira, onde o vapor produz trabalho mecânico, do condensador, onde o vapor é condensado.

Sadi Carnot era plenamente consciente dessa realidade e da necessidade de estudo dessas máquinas, como bem podemos concluir a partir do tom de abertura da sua obra “*Reflexões sobre a Potencia Motriz do Fogo*” (1824):

O estudo dessas máquinas é do mais alto inte-

resse, sua importância é imensa, seu uso está crescendo diariamente e parecem destinadas a produzir uma grande revolução no mundo civilizado. A máquina a vapor já explora nossas minas, impele nossos navios, escava nossos canais e nossos rios, forja o ferro, talha a madeira, mói os grãos, fia e tece nossas roupas, transporta as cargas mais pesadas, etc. Parece que um dia servirá como motor universal e como substituto para a força animal, quedas d'água e correntes de ar. Sobre os primeiros motores tem a vantagem da economia; sobre os outros dois a vantagem inapreciável de poderem se empregadas em qualquer momento e lugar, e não sofrer interrupção em seu trabalho.[3, p.2]

Para Carnot, o fenômeno da produção de movimento pelo calor não havia sido, até então, considerado de um ponto de vista suficientemente geral, o que dificultava o reconhecimento de seus princípios e estudo de suas leis. Não deixando de reconhecer os méritos britânicos do trabalho até então realizado, Carnot enfatizava que a teoria em torno das referidas máquinas havia avançado muito pouco e as tentativas para aperfeiçoá-la estavam quase que sendo conduzidas ao acaso. Segundo ele:

Para considerar em toda sua generalidade o princípio da produção de movimento pelo calor, é necessário concebê-lo independentemente de todo mecanismo, de todo agente particular; é necessário estabelecer raciocínios aplicáveis, não somente às máquinas a vapor, mas a qualquer máquina de fogo imaginável, seja qual for a substância motora utilizada e qualquer que seja o seu método de funcionamento.[3, p.8]

Carnot sentia falta, no estudo das “*máquinas de fogo*” de uma teoria fundada em “*princípios gerais solidamente estabelecidos e aplicáveis em quaisquer circunstâncias*” [3, p.8]. Claro que a sua grande referência aqui era a Mecânica, cujo triunfo, era praticamente um consenso.

A ciência do calor à época de Carnot se restringia aos estudos dos gases feitos por Robert Boyle (1627-1691), Edme Mariotte (1627-1691) e Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) e aos estudos experimentais de calorimetria do fisiologista escocês Joseph Black (1728-1799), iniciados por volta de 1861.

No final do século XVIII vários cientistas vinham trabalhando no sentido de estender a mecânica aos fenômenos do calor, o que não se constituía em novidade na medida que Daniel Bernoulli (1700-1792), Leonard Euler (1707-1783), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) e Pierre Simon Laplace (1749-1827) já haviam tentado tratar os gases como sistemas mecânicos.

No entanto, embora reconhecendo a necessidade de uma “teoria completa” para as “máquinas de fogo”, Carnot estava consciente das limitações impostas pelo atual

estágio de desenvolvimento das leis da física, ainda incapazes de “*fazer conhecer de antemão todos os efeitos do calor quando atua de uma forma determinada sobre um corpo qualquer.*” [3, p.8-9]. Um dos efeitos fundamentais do calor identificados por Carnot no funcionamento das máquinas a vapor, e que será nuclear na compreensão do seu raciocínio, é o que ele caracterizava como a “*restauração do equilíbrio no calórico*” [3, p.9]. O trecho a seguir indica bem esse raciocínio de Carnot.

A produção do movimento nas máquinas a vapor é sempre acompanhada de uma circunstância na qual devemos fixar nossa atenção. Esta circunstância é a restauração do equilíbrio no calórico, isto é, sua passagem de um corpo a uma temperatura mais ou menos elevada, a outro cuja temperatura é menor. O que acontece, de fato, quando uma máquina a vapor está em atividade? O calórico, desenvolvido no queimador por efeito da combustão, atravessa as paredes da caldeira, dá lugar a formação do vapor, ao qual de alguma maneira se incorpora. O vapor, arrastando-o consigo, o leva primeiro ao cilindro, onde cumpre uma determinada função, e depois o transporta ao condensador, onde se liquefaz pelo contato com a água fria que ali se encontra. Por último, a água fria se apodera do calórico desenvolvido pela combustão. Ela se aquece por meio do vapor, como se houvera estado diretamente no queimador. Aqui o vapor não é senão um meio de transporte do calórico. [3, p.9-10]

Com base neste raciocínio, Carnot vai estabelecer, como princípio geral, que a produção de potência motriz na máquina a vapor se deve não a um consumo real de calórico, mas ao seu transporte de um corpo quente (fonte quente) para um corpo frio (fonte fria), ou seja, na restauração do seu equilíbrio. Consequentemente o calórico é conservado na operação da máquina, sendo o calórico retirado da fonte quente totalmente transferido para a fonte fria. [3, p.10-11]

Ele ainda lança mão de uma interessante analogia, sugerindo que o fluxo de calor de um corpo quente (fonte quente) para um corpo frio (fonte fria) transforma sua potência motriz em trabalho mecânico, a exemplo do que acontece em uma queda d'água. Da mesma forma que a altura da queda d'água e a quantidade de água indicam maior ou menor capacidade de realizar trabalho, a potência motriz do calor depende, além da quantidade de calórico empregado, da diferença de temperatura entre os corpos que trocam esse calórico. Essa diferença corresponderia a altura no caso da queda d'água. [3, p.28]

Mais do que na natureza do calor propriamente dita, o grande interesse de Carnot estava no rendimento das máquinas térmicas, e seu trabalho vai se concentrar no estudo da possibilidade de se alcançar um máximo de

trabalho em uma máquina. Ele coloca a questão nos seguintes termos:

Frequentemente se tem levantado a questão de se saber se a potência motriz do calor é limitada ou ilimitada; se os aperfeiçoamentos possíveis das máquinas de fogo tem um limite prefixado, que a natureza mesma das coisas impede de ultrapassar por qualquer meio que seja, ou se, pelo contrário, esses aperfeiçoamentos são suscetíveis de uma extensão indefinida. Durante muito tempo também se tem tentado saber, inclusive ainda hoje, se não existiriam agentes preferíveis ao vapor d'água para desenvolver o vapor motriz do fogo; se o ar atmosférico, por exemplo, não apresentaria, com relação a esta questão, grandes vantagens. Nos propomos submeter aqui estas questões a um exame ponderado. [3, p.6-7]

Enquanto muitos buscavam aumentar a eficiência das máquinas substituindo o vapor d'água por outra substância, Carnot indicava, como proposição geral, a diferença de temperatura das fontes como o fator determinante: “*A potência motriz do calor é independente dos agentes que intervêm na sua realização; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos entre os quais se faz o transporte do calórico*” [3, p.38]

O CICLO DE CARNOT

Estabelecidos os princípios teóricos gerais de funcionamento das máquinas térmicas, Carnot se lançou na tarefa de demonstrar que a sua máxima eficiência dependia de um ciclo especial de operação (posteriormente conhecido como **Ciclo de Carnot** - o nosso aniversariante), idealizado, com as seguintes características:

- A máquina deveria poder operar em ciclos sucessivos;
- A substância de operação (considerada como um gás ideal) deveria ser capaz de transferir calor da fonte quente para a fonte fria sem perdas;
- A máquina deveria poder operar “de trás para frente”, ou seja, reversivelmente - isto significa que ela pode operar como um refrigerador.

A máquina consiste em um cilindro preenchido com um fluido (gás) com um êmbolo capaz de ser movido em seu interior. Há ainda dois corpos A e B, mantidos a temperatura constante, sendo que a temperatura de A é maior do que a temperatura de B.

Reproduzo na figura 2 o esboço original da máquina de Carnot em suas “*Réflexions Sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes a Développer Cette Puissance*” (1824).

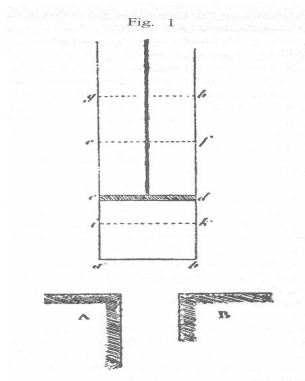


Figura 2: Esboço original de Carnot para a operação de uma máquina térmica

Embora as operações sejam descritas por Carnot em uma sequência de 7 etapas, elas podem ser descritas de maneira sucinta, numa linguagem moderna, nas seguintes quatro etapas:

1. **Expansão isotérmica:** A fonte quente e a substância de operação (gás) estão em contato, à mesma temperatura. O gás retira calor da fonte quente e sofre uma expansão isotérmica, empurrando o êmbolo, ou seja, realizando trabalho.
2. **Expansão adiabática:** Isolado termicamente do exterior, o gás se esfria a medida que se expande (ainda realizando trabalho) até atingir a temperatura da fonte fria, quando o processo é interrompido.
3. **Compressão isotérmica:** Em contato com a fonte fria, à mesma temperatura desta, o gás é comprimido isotermicamente (sofre trabalho), transferindo calor para a fonte fria.
4. **Compressão adiabática:** Já afastado da fonte fria, isolado termicamente do exterior, o gás é comprimido até atingir a temperatura da fonte quente, reiniciando o ciclo.

A figura 3 representa os estágios do ciclo de Carnot para um dado sistema e o diagrama PxV correspondente.

Observe que o princípio geral de conservação do calórico, ou seja, de transferência integral de calórico de uma fonte quente para uma fonte fria, estabelecido como condição de funcionamento da máquina, é o que permite a sua operação em ciclos sucessivos.

Em seguida Carnot faz uma demonstração de que a eficiência de uma máquina térmica funcionando segundo o ciclo proposto por ele (“Ciclo de Carnot”), além de apresentar a máxima eficiência, independe da substância de operação. Para isso ele supõe a existência de duas máquinas operando de maneira acoplada, entre as mesmas temperaturas T_A e T_B (onde $T_A > T_B$), porém utilizando substâncias de operação diferentes. Uma das máquinas (M_R) opera em um ciclo reversível (“Ciclo de

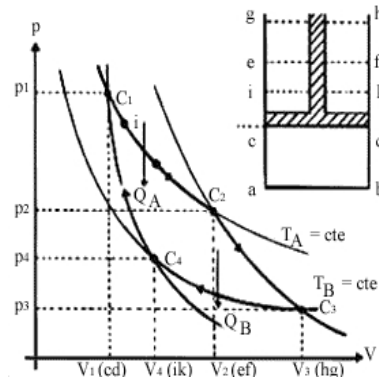


Figura 3: Ciclo de Carnot representado em um diagrama PxV.

Carnot”) e a outra (M_I) em um ciclo irreversível. A ideia de Carnot foi utilizar parte do trabalho realizado por M_I para operar M_R inversamente.

Observe que subjacente a esta ideia está a suposição de que o trabalho realizado por M_I (W_I) é maior do que o trabalho realizado por M_R (W_R). Esta suposição é uma outra forma de postular, a priori, um rendimento maior para a M_I com relação a M_R (é exatamente esta hipótese que ele quer avaliar). Assim, M_I retira calórico da fonte quente (T_A), e o despeja na fonte fria (T_B), realizando um certo trabalho W_I (e aqui é importante lembrar que no raciocínio de Carnot a realização desse trabalho não consome calórico). Somente uma parte deste trabalho (W_R) é utilizada para operar M_R inversamente, para que esta devolva para a fonte quente (T_A) a quantidade de calórico recebida pela fonte fria (T_B).

Mas onde está o problema aqui?

O problema (na verdade um grande problema) com este raciocínio (baseado na suposição de que $W_I > W_R$), e foi isso que Carnot quis nos mostrar, está no fato de que ao aceitarmos essa situação estaríamos aceitando a possibilidade de existência de uma máquina capaz de produzir trabalho gratuitamente, sem consumo de combustível. E isto é inaceitável! Essa operação conjunta das duas máquinas nos remete a ideia de *moto-contínuo*, isto é, de uma máquina capaz de produzir trabalho ininterruptamente sem qualquer consumo de combustível [4, p.63].

A conclusão, portanto, é que o rendimento de M_I não pode ser maior que o rendimento de M_R . Dito de outra forma, nenhuma máquina térmica operando entre uma dada fonte quente e uma dada fonte fria pode ter rendimento superior ao de uma máquina de Carnot.

Você pode ainda estar se perguntando (e com muita razão): afinal de contas, de onde Carnot achava que vinha o trabalho realizado por M_I ? Revisemos rapidamente o raciocínio: M_I retira calórico da fonte quente (T_A), devolve integralmente todo esse calórico à fonte fria (T_B) e ainda realiza o trabalho W_I . A pergunta que não quer calar: Quem financia W_I ?

A resposta é bastante interessante para que possamos compreender o pensamento de Carnot, e em sua origem está a diferença (imprecisa) que ele fazia entre Calor (*Chaleur*) e Calórico (*Calorique*). Segundo ele, uma máquina térmica opera transformando a potencia motriz do calórico que flui entre as fontes (quente e fria). Essa potencia motriz, para uma dada quantidade de calórico, está diretamente relacionada à temperatura da fonte, e será tanto maior quanto maior for essa temperatura. Assim, a fonte quente (T_A) tem uma potência motriz maior do que a fonte fria (T_B). É exatamente com essa diferença que M_I realiza o trabalho W_I .

O fato é que Carnot não compreendeu muito bem o funcionamento de uma máquina irreversível, pois não dispunha de uma teoria que diferenciava precisamente calor de calórico e, portanto, fosse capaz de justificar a existência de processos irreversíveis sem apelar (como seu raciocínio nos força a admitir), para a ideia de produção de calórico, que ele próprio dizia descartar. Mas é

inegável que a sua contribuição foi essencial. Abriu portas! Nas mãos de Rudolf Clausius (1822-1888) o trabalho de Carnot ganharia uma nova interpretação, consolidando uma teoria do calor que faria a Termodinâmica alcançar um desenvolvimento sem precedentes.

CONCLUSÃO

Ao longo desse artigo, buscamos resgatar o pensamento de Sadi Carnot em sua obra “*Réflexions Sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes a Développer Cette Puissance*” (1824), marcando assim os 190 anos da proposição do chamado “Ciclo de Carnot”, cujo papel foi central no nascimento e posterior desenvolvimento da Termodinâmica. Mesmo adotando uma concepção de calor compreendido como um fluido material (calórico), Carnot foi capaz de conduzir raciocínios que foram centrais para o desenvolvimento teórico da ciência do calor.

-
- [1] Carnot era adepto de uma concepção que entendia o calor como um fluido material (calórico) que preenchia o interior dos corpos materiais (sólidos, líquidos e gases) e que durante a operação de uma máquina térmica seria transferido (não consumido) de uma fonte quente para uma fonte fria.
- [2] P. M. C. Dias, Revista Brasileira de Ensino de Física **23**, 226 (2001).
- [3] S. Carnot, *Réflexions Sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes a Développer Cette Puissance* (Bachelier, Paris, 1824).
- [4] S. Quadros, *A Termodinâmica e a Invenção das Máquinas Térmicas* (Scipione, São Paulo, 1996).