

CARNOT E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Júlio César Passos¹

RESUMO

O presente artigo apresenta dados históricos sobre as primeiras máquinas térmicas e os avanços da termodinâmica que, em geral, estão ausentes dos livros-textos utilizados em nossas universidades. Especial atenção é dada ao ensaio de Carnot, publicado em 1824, no qual foram apresentados os conceitos de um ciclo térmico ideal que se tornaram as bases da segunda lei e permitiram o desenvolvimento da termodinâmica como ciência. A introdução de elementos de história e filosofia da ciência, no estudo da termodinâmica, pode contribuir para um melhor entendimento dos conceitos sobre a segunda lei.

Palavras-chave: termodinâmica, 2^a lei, entropia, Carnot, ensino de engenharia

ABSTRACT

This paper presents historical data concerning thermal machines and thermodynamics that, in general, are not presented in the textbooks used in our universities. Special attention is given to Carnot's work, published in 1824, in which the concepts of an ideal thermal cycle were presented which became the bases of the second law and allowed the development of thermodynamics as a science. The introduction of elements of the history and philosophy of science can contribute to a better understanding of the concepts relating to the second law of thermodynamics.

Keywords: thermodynamics, 2nd law, entropy, Carnot, engineering education

INTRODUÇÃO

Devido à importância da termodinâmica como disciplina básica nos cursos de engenharia e em particular nos de engenharia mecânica a sua existência representa uma etapa importante na formação dos estudantes, com repercussão no restante da formação do engenheiro mecânico. A experiência mostra que o conteúdo e a forma de ensinar termodinâmica podem influenciar na escolha da ênfase profissional do futuro engenheiro podendo levá-lo para a área de fluidos e ciências térmicas em geral. A termodinâmica

clássica, devido à simplicidade de suas premissas e ao grande número de assuntos a que se aplica, foi considerada por Albert Einstein como a única teoria física de conteúdo geral sobre a qual ele estava convencido que dentro dos limites de aplicação de seus conceitos fundamentais nunca seria refutada, ver Kirillin et al. (1976).

O ensino da termodinâmica apresenta dificuldades, principalmente, no que se refere à segunda lei, não apenas para os alunos mas também para os professores. Diferentemente da primeira lei, onde o aspecto quantitativo da conservação da energia é facilmente

¹ Professor, Doutor. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, LABSOLAR-NCTS, Centro Tecnológico - 88.040-970 Florianópolis-SC, Tel.: 0—48 234 21 61-R 217 jpassos@emc.ufsc.br

compreendido, a segunda lei refere-se a aspectos qualitativos sobre a transformação do calor em trabalho, cujos conceitos mais abstratos destoam daqueles normalmente presentes nas demais disciplinas da formação do engenheiro mecânico. O autor está convencido de que o ensino da termodinâmica permeado de passagens e acontecimentos históricos, sobre o desenvolvimento das máquinas térmicas ou da própria história da ciência termodinâmica, pode contribuir para um melhor entendimento da disciplina. Muitos exemplos podem, inclusive, ser introduzidos na forma de exercícios, envolvendo o cálculo do rendimento das primeiras máquinas térmicas. Estes aspectos são os elementos que motivam esta pesquisa.

Após esta introdução será feita uma síntese dos acontecimentos históricos que mostra algumas das descobertas importantes tanto no campo tecnológico, marcado por inovações e invenções envolvendo as máquinas térmicas, como no campo científico da história da termodinâmica, além de dados sobre a vida de Carnot. Em seguida, serão apresentados dados sobre a obra de Carnot e, finalmente, serão mostradas as principais consequências dos conceitos propostos por Carnot (1824).

O objetivo do artigo é fornecer aos que se interessam pelo estudo da termodinâmica informações que, segundo a experiência do

autor, poderão auxiliar no ensino da segunda lei.

Ao longo do artigo serão apresentados trechos colhidos em Carnot (1824) e que serão indicados por “ ” e cuja tradução feita pelo presente autor pretendeu ser fiel ao espírito da obra original.

CONTEXTO HISTÓRICO

Na Tab. (1), são listados alguns dos acontecimentos importantes que marcaram a época e o pensamento de Carnot e que constituem o prelúdio da história da termodinâmica. Uma completa revisão dos fatos marcantes sobre a história das máquinas térmicas é uma tentação que deve ser evitada pois está além dos objetivos deste trabalho.

A famosa e única obra científica de Carnot, de 1824, publicada em seiscentos exemplares às expensas do autor quando o mesmo tinha 28 anos de idade, tendo por título *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas adequadas ao desenvolvimento dessa potência* (no original: *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*), apresenta uma reflexão crítica sobre o calor como causa do movimento e sobre a potência motriz manifesta nas máquinas a vapor já bastante conhecidas e espalhadas pela Europa e, particularmente, pela Inglaterra, ver Carnot (1824).

Tabela 01. Datas e acontecimentos importantes

Ano	Autor	Fato e comentário	Fonte
1698	Thomas Savery (1650-1715) Oficial do exército inglês, natural da Cornuália, região onde havia exploração de minas de cobre.	Savery apresenta o seu invento a Guilherme III. A máquina de Savery era constituída de uma caldeira e de um reservatório e fora utilizada para retirar a água que invadia as galerias das minas de cobre.	Mantoux (1905) p. 313-315
1705 ou 1706	Thomas Newcomen (1663-1729) Ferreiro e serralheiro, em Dartmouth, no Devonshire.	A máquina de Newcomen sofreu várias melhorias até alcançar a forma prática de 1720 que conservou, com poucas modificações, durante mais de um século. Na máquina de Newcomen, o vapor produzido na caldeira preenchia um reservatório que uma vez em contato com a água fria permitia a criação de vácuo, no reservatório, provocando a descida de um êmbolo, que movimentava um balancim capaz de acionar uma bomba.	Mantoux (1905) p. 315-318.
1783	Lazare Carnot (1753-1823)	Publicação do livro “Ensaio sobre as	Fox (1978)

	Pai de Sadi Carnot	máquinas em geral”, onde discute a forma de se ter uma máquina com funcionamento ideal.	
1769	James Watt (1736-1819) Fabricante de instrumentos de laboratório que teve dificuldades para trabalhar livremente pois não pertencia à confraria dos instrumentistas. Pôde desenvolver os seus trabalhos por ter sido contratado pela Universidade de Glasgow-Escócia que o nomeou, em 1757, como seu “Fabricante Oficial de Instrumentos Matemáticos”. Sobre ele, escreveu Robinson, após ter conhecido Watt, então com 22 anos: “Eu esperava encontrar um operário, encontrei um filósofo”.	Primeira patente requerida por Watt para a máquina a vapor. James Watt teve um papel importante no aperfeiçoamento do condensador, além de ter sido o autor de várias patentes importantes, envolvendo inovações tecnológicas, na máquina a vapor. No inverno de 1763 a 1764 teve de consertar um pequeno modelo da máquina de Newcomen, pertencente à Universidade de Glasgow e que era utilizado para demonstração no curso de Física. A grande idéia de Watt foi aperfeiçoar o condensador, fazendo que o mesmo ficasse separado do cilindro. Para poder ler as obras científicas estrangeiras, estudou francês, italiano e alemão.	Mantoux (1905) p. 319-341. Sproule (1993)
1774		James Watt deixa a Escócia e muda-se para Birmingham-Inglaterra, onde se associa a Matthew Boulton e passam a fabricar a máquina a vapor.	Sproule (1993)
1800		Expira a patente da máquina de Watt. Chega ao fim a sociedade Boulton&Watt	Sproule (1993)
1822	Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830)	Publicação da Teoria Analítica do Calor	
1824	Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)	Publica 600 exemplares do livro “Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas adequadas ao desenvolvimento dessa potência” Descobre o trabalho de Carnot.	Fox (1978)
1833	Benoît Paul Emile Clapeyron (1799-1864)		Fox (1978), Prigogine e
1834		Publica um artigo, no Jornal da Escola Politécnica – França, onde representa o ciclo descrito por Carnot para um gás, em um diagrama pressão-volume (p x V).	Kondepudi (1999), Bejan (1988)
1845	William Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907)	Não consegue encontrar a obra de Carnot e nenhum livreiro conhece a obra. Propõe uma escala absoluta de temperatura, derivada dos conceitos de Carnot	Fox (1978)
1848			Dugdale (1996)
1854		Propõe nova escala absoluta (hoje escala KELVIN)	Dugdale (1996)
1860	Rudolf Clausius (1822-1888)	Introduz o conceito de entropia	Prigogine e Kondepudi (1999)
1865		Introduz a grandeza entropia	

É interessante observar que embora a segunda lei seja apresentada, nos livros e cursos de termodinâmica, após o estudo da primeira lei, tanto uma como a outra surgiram ao mesmo tempo, por volta de 1850, ver Bejan (1988). O princípio de conservação da energia, conhecido em mecânica, é bem mais antigo e a primeira lei da termodinâmica, embora sendo uma aplicação deste princípio para os problemas térmicos, só foi formulada por volta de 1850, conforme citado por Bejan (1988). Considerando-se o caráter fundamental do trabalho de Carnot (1824), pode-se concluir que a segunda lei surgiu antes da primeira.

Os acontecimentos listados, na Tab. (1), mostram dois caminhos relativamente

independentes, o da tecnologia e da inovação relacionado com as máquinas térmicas, e o da teoria e do avanço científico. Enquanto o formalismo científico atinge um marco com o trabalho de Carnot e quase quatro décadas depois, já na segunda metade do século dezenove, com o de Clausius, os avanços tecnológicos nas máquinas a vapor, incluindo, aí, as primeiras máquinas de “fogo”, ou bombas de “fogo”, permitiram que essas já operassem por mais de um século e meio, no Reino Unido.

Na Tab. (2), são resumidos alguns dados biográficos de Sadi Carnot, extraídos de Fox (1978).

Tabela 02. Dados sobre a vida de Sadi Carnot, Fox (1978)

Ano	Acontecimento
1796, 1º de Junho	Nascimento, em Paris, de Nicolas Léonard Sadi Carnot
1812, Outubro	Ingressa na Escola Politécnica – França. Traduz um artigo, escrito por John Farey, sobre a Máquina a Vapor de James Watt.
1814, Outubro	Sub-tenente, na Escola de Metz
1821, Junho	Viagem à Alemanha
1827, Outubro	Capitão da engenharia
1828, Maio	Demissão do exército como capitão do estado maior da engenharia
1832, 24 de Agosto	Morre aos 36 anos, em Paris, vítima do cólera.

A OBRA DE CARNOT

“Ninguém ignora que o calor possa ser a causa do movimento e que possua mesmo uma grande potência motriz: as máquinas a vapor, hoje tão difundidas, são uma demonstração visível disto.” No original: *Personne n’ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu’elle possède même une grande puissance motrice: les machines à vapeur, aujourd’hui si répandues, en sont une preuve parlante à tous les yeux.* Desta forma Carnot (1824) inicia a apresentação de suas reflexões sobre a potência motriz do fogo.

A obra de Carnot (1824) foi escrita na forma de ensaio, sem divisões, em cento e dezenove páginas, contendo em média dezoito linhas cada. Na página 6 do ensaio, Carnot presta uma homenagem a Savery, Newcomen, Smeathon, ao célebre Watt e a outros engenheiros ingleses, considerados os criadores da máquina de fogo,

como era chamada a máquina a vapor. No original: *Si l’honneur d’une découverte appartient à la nation où elle a acquis tout son accroissement, tous les développements, cet honneur ne peut être ici refusé à l’Angleterre: Savery, Newcomen, Smeathon, le célèbre Watt, Woolf, Trevetick et quelques autres ingénieurs anglais, sont les véritables créateurs de la machine à feu; elle a acquis entre leurs mains tous ses degrés successifs de perfectionnements.*

A razão desse ensaio decorria do fato “de se questionar, com frequência, se a potência motriz do calor é limitada ou sem limites: se os aperfeiçoamentos possíveis das máquinas a fogo possuem um limite, que a *natureza das coisas* impede de ser ultrapassado, qualquer que sejam os meios, ou se, ao contrário, tais aperfeiçoamentos são susceptíveis de um aumento indefinido.” Carnot considera, à página 8, que “ao contrário das máquinas cujos movimentos não dependem do calor e que

podem ser estudadas pela teoria mecânica, as máquinas a fogo necessitam de uma teoria semelhante.”

De acordo com Fox (1978) e Prigogine e Stengers (1984), Sadi Carnot teria sido influenciado pelo próprio pai cujo interesse pelo estudo da hidráulica é confirmado pela sua publicação, em 1783 de um ensaio sobre máquinas hidráulicas onde embora nenhuma consideração fosse feita sobre as máquinas térmicas estabelecia as condições para uma máquina atingir o rendimento ótimo (Fox, 1978).

A Descoberta de um Ciclo Ideal

Carnot (1824) descreve um ciclo ideal para um sistema constituído de um gás, contido em um cilindro equipado com um êmbolo livre, sem atrito. Na Fig. (1) está representado o esquema semelhante ao apresentado por Carnot, ver também Dugdale (1996). Os corpos A e B representam reservatórios térmicos cujas temperaturas T_A e T_B são constantes e T_A é maior do que T_B . São indicadas quatro posições para o êmbolo. Com o êmbolo, inicialmente na posição c-d, o sistema é colocado em contato com o reservatório A. Na Tab. (3), são apresentadas as diferentes etapas do ciclo térmico idealizado por Carnot (1824).

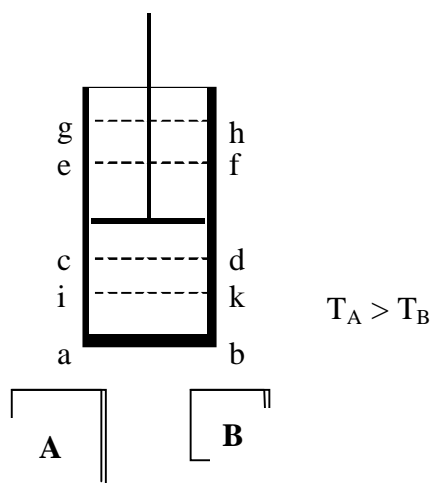


Figura 1. Experimento teórico de um ciclo ideal (Carnot, 1824).

Carnot enfatiza diversas vezes que o máximo aproveitamento do calor (ou calórico

como chamava Carnot) para a produção do movimento ocorreria quando todas as mudanças de temperatura, no fluido, acontecessem devido a mudanças de volume.

Carnot viu com clareza que os fluidos elásticos (gás ou vapor) são os verdadeiros instrumentos apropriados ao desenvolvimento da potência motriz do calor. Isto ficou registrado, à página 41 do ensaio. “Quando um gás mantido a uma temperatura constante passa de um volume (V_1) e pressão (p_1) para um outro volume (V_2) e outra pressão (p_2) a quantidade de “calórico” absorvido ou abandonado é sempre a mesma, independentemente do tipo de gás.” Carnot chama de teorema esta propriedade, apesar de reconhecer, à página 42, que a quantidade de calor absorvida ou liberada nunca havia sido medida por nenhuma experiência direta. Carnot escreve que durante os processos de expansão ou compressão isotérmica as quantidades de calor absorvida ou liberada pelo gás seguem uma progressão aritmética quando o volume aumentado ou diminuído é submetido a uma variação seguindo uma progressão geométrica.

É importante observar que Carnot não apresentou o gráfico do ciclo termodinâmico por ele descrito. A representação do ciclo idealizado por Carnot foi apresentada por Clapeyron na forma de um gráfico p-V, dez anos depois, em 1834, ver Prigogine e Kondepudi (1999).

Carnot (1824) apresenta de forma clara que o modelo de ciclo por ele idealizado não permite grandes diferenças de temperatura entre o corpo A e o sistema ar, durante as etapas 1,2 e 6, assim como entre o corpo B e o ar, durante a etapa 4. Matematicamente, tem-se:

$$T_{ar1} = T_A - dT \quad (1)$$

$$T_{ar4} = T_B + dT \quad (2)$$

As Eqs. (1) e (2) tornam o ciclo quase-reversível e permitem obter as mesmas quantidades de potência motriz, em cada temperatura, quando se opera no sentido inverso, comprimindo o ar, da posição e-f para i-k, ou expandindo o ar da posição c-d para g-h.

Desta forma, desprezando-se qualquer atrito entre o pistão e as paredes do cilindro, a quase reversibilidade é alcançada ao se abolir qualquer transferência de calor através de diferenças finitas de temperatura e qualquer

aumento ou diminuição de temperatura do ar que exija contato térmico ou transferência de calor entre o fluido de trabalho e o meio, ou vice-versa.

Tabela 03. Etapas do ciclo ideal apresentado por Carnot (1824), às págs. 32-34

Etapa	Posição do pistão (ver Fig. 1)	Descrição	Característica
1	c-d	O sistema (gás) ocupando o volume abcd é colocado em contato com o reservatório A, à temperatura T_A , e mantido à temperatura $T_A - dT$.	Estado inicial do ciclo
2	e-f	A temperatura do ar é mantida à $T_A - dT$, enquanto o pistão se desloca, gradualmente, entre c-d e e-f.	Expansão isotérmica do ar
3	g-h	É desfeito o contato térmico entre o sistema e o reservatório A, ou qualquer outro corpo capaz de fornecer calor. A expansão do ar, entre e-f e g-h, acarreta uma diminuição da sua temperatura, até $T_B + dT$.	Expansão adiabática do ar
4	c-d	O sistema ar é colocado em contato com o corpo B, sendo comprimido entre as posições g-h e c-d, enquanto a temperatura do ar é mantida à $T_B + dT$.	Compressão isotérmica do ar
5	i-k	É desfeito o contato térmico entre o sistema e o reservatório B. A compressão adiabática do gás, entre c-d e i-k, acarreta um aumento da sua temperatura de $T_B + dT$ para $T_A - dT$.	Compressão adiabática do ar
6	e-f	O sistema é colocado, novamente, em contato com o corpo A e o pistão vai da posição i-k para a posição e-f., sem modificar a sua temperatura $T_{ar} = T_A - dT$.	Expansão isotérmica do ar
7		Continuação do novo ciclo, seguindo as etapas 3, 4, 5, 6 e 7	

Antes de descrever o ciclo conforme indicado, na Tab. 3, Carnot (1824) descreveu um ciclo semelhante com vapor. Neste caso, as pressões correspondentes às temperaturas de saturação do vapor, T_A , e do condensado, T_B , são constantes e iguais a p_1 e p_4 , respectivamente, com $p_1 = p_2 = p_6$.

DESDOBRAMENTOS

A Representação Gráfica do Ciclo de Carnot

A importância dos conceitos apresentados por Carnot foi compreendida por vários estudiosos da termodinâmica e tiveram

como conseqüência a formulação da segunda lei da termodinâmica, na forma como a conhecemos, hoje, ver Prigogine e Kondepudi (1999). Derivam do trabalho de Carnot o conceito de escala absoluta ou escala termodinâmica, que independe do fluido de trabalho, proposto por Thomson, em 1848, e o conceito de entropia, proposto por Clausius, em 1860 e 1865, conforme indicados na Tab. (1).

O ciclo descrito na seção anterior e que representa a principal contribuição para a história da termodinâmica ficou esquecido durante dez anos. Em 1834, Clapeyron o apresentou em um gráfico p-V,

representado na Fig. 2, sob o nome de ciclo de Carnot.

Como está resumido, na Tab. 3, o ciclo é constituído por duas transformações isotérmicas, uma de expansão, onde calor é recebido da fonte quente, à temperatura T_A , e a outra de compressão, onde o calor é entregue à fonte fria, à T_B , e duas adiabáticas, uma expansão, na qual o sistema tem a sua temperatura reduzida de T_A para T_B , e uma compressão, em que a temperatura é aumentada de T_B para T_A . Esta simples e grande idéia é que possibilitou a Carnot construir um modelo de ciclo, no qual nenhuma irreversibilidade térmica com o meio exterior, do ponto de vista da transmissão do calor, fosse necessária.

O Rendimento Máximo

Carnot (1824) concluiu que a forma acima era a maneira de se obter o máximo de rendimento, com um gás realizando um ciclo em que as modificações de temperatura do gás ou vapor não dependessem de nenhum contato térmico com o meio.

Concluiu que o melhor aproveitamento dependia apenas das temperaturas das fontes quente e fria, T_A e T_B , respectivamente, conforme esquema da Figura 1. Considerando-se a definição de rendimento de um ciclo térmico:

$$\eta = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \quad (3)$$

onde Q_A e Q_B representam as quantidades de calor recebida da fonte quente, a T_A , e cedida à fonte fria, T_B , respectivamente. Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica em cada uma das transformações do ciclo de Carnot e a equação de gás perfeito:

$$pV = mRT \quad (4)$$

onde p , V , m , R e T representam a pressão, o volume, a massa de gás, a constante do gás e a temperatura absoluta, respectivamente. Sabendo-se que as transformações adiabáticas reversíveis 2-3 e 4-5, conforme indicado na Figura 2, estão relacionadas pela equação

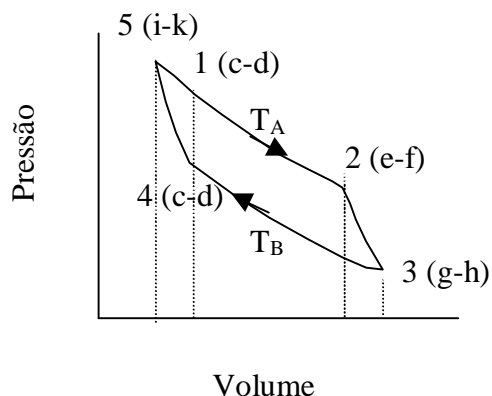


Figura 2. Representação gráfica do ciclo de Carnot, apresentada por Clapeyron.

$pV^k = \text{Cte}$, ver Sonntag et al. (1998), Moran e Shapiro (1995), Çengel e Boles (1994): onde k representa o coeficiente politrópico de uma transformação adiabática. Assumindo o ar como um gás perfeito, chega-se à:

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_5} \quad (5)$$

Permitindo que se demonstre que:

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{T_B}{T_A}, \quad (6)$$

o rendimento máximo de um ciclo térmico, o chamado rendimento de Carnot, é função apenas da razão das temperaturas absolutas T_A e T_B , conforme equação, abaixo.

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A} \quad (7)$$

A equação, acima, deriva dos trabalhos de Carnot e a igualdade entre a razão das temperaturas absolutas (em Kelvin) dos reservatórios de baixa temperatura T_B e de alta temperatura T_A com a razão das quantidades de calor, conforme Eq. 6, foi demonstrada por Thomson, o lorde Kelvin, ver Tab. 1 e Dugdale (1996). Embora Carnot não forneça esta equação em seu ensaio ele apresenta argumentos ou teoremas, conforme suas palavras, que foram fundamentais para o desenvolvimento da segunda lei.

O primeiro desses teoremas diz que o rendimento máximo de um ciclo reversível só depende das temperaturas T_A e T_B .

O segundo teorema diz que a potência motriz e, conseqüentemente, o rendimento de uma máquina de fogo é independente da substância de trabalho.

Na página 28 do ensaio, Carnot faz a analogia da potência motriz de um ciclo ideal à de uma queda d'água. No caso de uma queda d'água, a potência depende da altura da queda e da vazão. No caso da máquina térmica, ou máquina de fogo, a potência motriz depende da quantidade de calórico e da diferença entre as temperaturas T_A e T_B , dos reservatórios térmicos de alta e de baixa, respectivamente. Além disso, como escreveu às páginas 130 e 131, a maior potência motriz é verificada para uma queda de calórico nos níveis de temperatura mais baixos do que naqueles mais elevados.

É importante observar que o rendimento máximo do ciclo ideal proposto por Carnot conduz a um valor limite do rendimento, inferior à unidade, e que este valor limite não está associado a nenhuma forma de irreversibilidades ou perdas.

O Grande Legado de Carnot

As idéias contidas no trabalho de Carnot (1824) representam, segundo Serres (1997) e Prigogine e Stengers (1984) um corte epistemológico em relação ao pensamento científico do século 19. Vários autores de filosofia da ciência chamam esses avanços de revolução de Carnot, ou revolução carnotiana, uma vez que a sua aceitação significava um rompimento com a epistemologia então dominante.

Serres (1997) considera que o legado de Carnot representou a interseção da revolução industrial com a revolução científica.

Stengers (1997) considera o ciclo de Carnot como uma arena onde se decidiu a relação entre a energia mecânica e o que se poderia chamar de energia termodinâmica regida pelas duas leis.

CONCLUSÕES

Tomando por base a obra original de

Carnot, foram revistos alguns aspectos importantes da concepção do ciclo ideal de Carnot. Ressaltou-se a importância das transformações adiabáticas reversíveis em que a mudança de temperatura resulta de uma variação de volume e não do contato de corpos a temperaturas bem diferentes.

Os aspectos históricos apresentados mostram duas trajetórias independentes, uma sobre o desenvolvimento das máquinas de fogo, hoje conhecidas como máquinas térmicas, baseado em inovação tecnológica, e a outra da ciência termodinâmica, esta surgindo posteriormente aos avanços tecnológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJAN, A. Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, 1988, p. 53.
- CARNOT, S. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. in R. Fox, Reprodução do trabalho original de Sadi Carnot de 1824. Librairie Philosophique Vrin, 1978, pp. 55-179.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 2nd ed., McGraw-Hill, 1994, Ch. 5.
- DUGDALE, J. S. Entropy and its Physical Meaning. Taylor & Francis, 1996.
- FOX, R. Sadi Carnot: Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu. Edição crítica com introdução e comentários, ampliada com documentos de arquivos e diversos manuscritos de Carnot, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1978.
- KIRILLIN, V. A.; SICHEV, V. V.; SHEINDLIN, A. E. Termodinâmica Técnica. Editorial Mir, Moscú, 1976, pág. 590.
- MANTOUX, P. A Revolução Industrial no Século XVIII. Editora UNESP/HUCITEC, 1905, Cap. IV, 2^a Parte, O ano da edição brasileira não é indicado.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 3rd ed., John Wiley & Sons, 1995, Ch. 5.
- PRIGOGINE, I.; KONDEPUDI, D. Thermodynamique: Des moteurs thermiques aux structures dissipatives. Ed. Odile Jacob, 1999, Pag. 58.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. A Nova Aliança. Ed. UnB, Brasília, 1984, 247 p.
- SERRES, M. Paris 1800. in Éléments d'Histoire des Sciences, M. Serre, Larousse-Bordas, Paris, 1997, Pág. 523.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. Fundamentals of Thermodynamics. 5th ed., 1998, Ch. 7.
 SPROULE, A. James Watt. Editora Globo, São Paulo, 1993.
 STENGERS, I. Thermodynamique: La Réalité Physique em Crise. La Découverte, Paris, 1997, Pag. 42.

DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR



Júlio César Passos.
 Engenheiro mecânico pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EE/UFRJ); mestre pela COPPE/UFRJ e doutor em engenharia térmica

pela Universidade Pierre et Marie Curie (Univ. Paris VI)/França, em 1989. Professor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (EMC/UFSC). Foi coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, de maio de 1998 a maio de 2002. Professor visitante, no INSA de Lyon, em janeiro e fevereiro de 2001 e 2002. Leciona as disciplinas de Termodinâmica, Fenômenos de Transporte e Transmissão do Calor, para cursos de engenharia, e Ebulição e Condensação, na pós-graduação (mestrado e doutorado). Linhas de pesquisa: intensificação de processos evaporativos, regime de ebulição nucleada, ebulição confinada, ebulição de misturas de refrigerantes e mudança de fase aplicada à indústria espacial, além de ensino de termodinâmica em engenharia.

ANEXOS

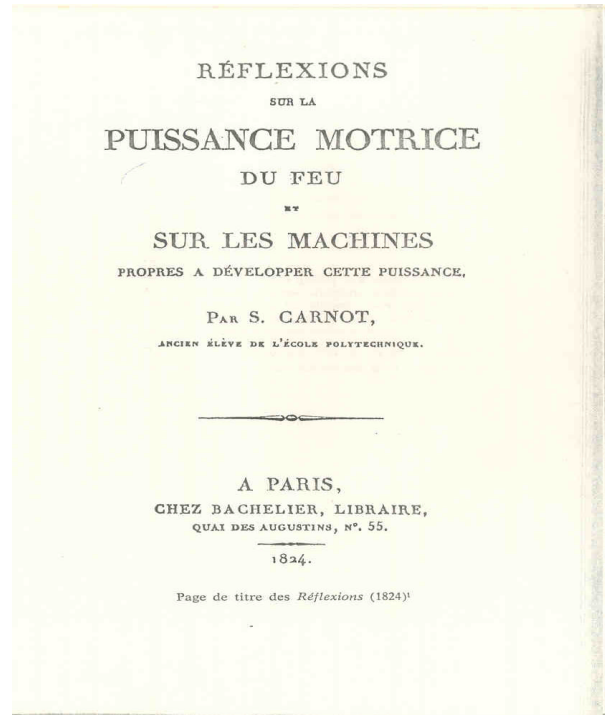
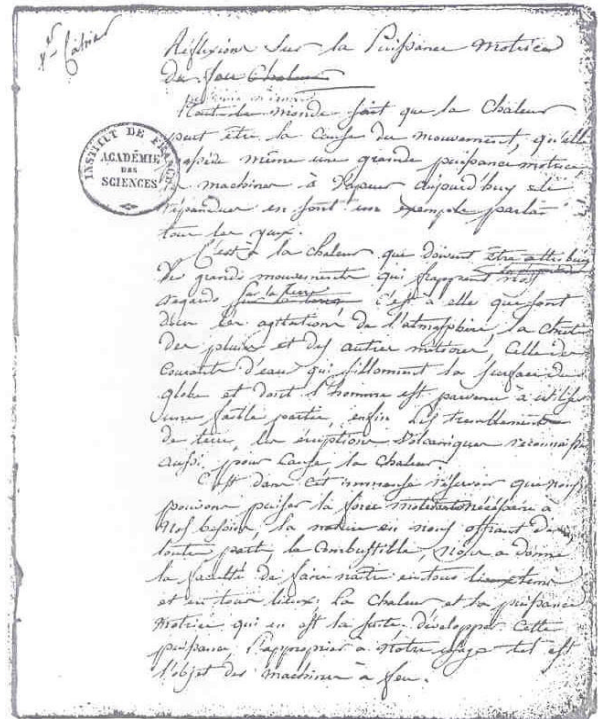


Figura A1: Cópia da página do livro de Carnot, de 1824 (extraída de Fox (1978), p. 55)



Reproduction de la 1^{re} page du manuscrit
 « Réflexions sur la puissance motrice du feu »

Figura A2: Reprodução da primeira página do manuscrito do livro de Carnot, de 1824 (extraída de Fox (1978), p. 58).

RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU^a

Personne n'ignore^b que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu'elle possède même une grande puissance motrice : les machines à vapeur, aujourd'hui si répandues, en sont une preuve parlante^c à tous les yeux².

C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvemens qui frappent nos^d regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages^e, la chute des pluies et des autres météores, les^f courans d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage^g une faible partie : enfin les tremblemens de terre, les éruptions volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur.

C'est dans cet immense réservoir que nous pouvons puiser la force mouvante^h nécessaire à

a. du feu] de la chaleur * — b. Personne n'ignore] Tout le monde sait * — c. une preuve parlante] un exemple parlant — d. nos] la plupart des *inséré au-dessus de la ligne et rayé* — e. [] l'ascension des nuages — f. les] celles des — g. employer pour son usage] utiliser — h. mouvante] motrice *.

Figura A3: Reprodução da primeira página do livro de Carnot, de 1824 (extraída de Fox (1978), p. 59).