



A IMPORTÂNCIA DO TRABALHO DE CARNOT PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA

Júlio César Passos - jpassos@emc.ufsc.br
Departamento de Engenharia Mecânica/LABSOLAR/NCTS
Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário - Trindade
88.040-900 – Florianópolis, SC

***Resumo:** O presente artigo tem como principal fonte de pesquisa o ensaio de Sadi Carnot e procura fazer uma reconstrução das principais idéias relacionadas com o ciclo ideal proposto por aquele autor e que serviu de base para a termodinâmica desenvolver-se como ciência. É feita uma comparação com o conteúdo que hoje é ensinado nos cursos de termodinâmica para engenheiros. Esta releitura mostra algumas das estratégias do método científico empregado por Carnot e que lhe permitiram superar as limitações do conhecimento em termodinâmica, no início do século dezanove, e obter a comprovação científica de teses jamais propostas e que hoje são consideradas a base da segunda lei da termodinâmica.*

***Palavras chave:** Termodinâmica, Ciclo de Carnot, Segunda lei, Ensino de engenharia*

1. INTRODUÇÃO

O único livro de Nicolas Léonard Sadi Carnot, publicado em 1824 e intitulado “*Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas adequadas a desenvolver esta potência*”, Carnot (1824), tem sido referência discreta nos livros textos de termodinâmica empregados em nossas universidades. Entretanto, é referência indispensável a todos os que procuram entender a gênese da segunda lei da termodinâmica e da história da termodinâmica. Sadi Carnot morreu jovem, com 36 anos de idade, em 1832. A importância do seu trabalho pode ser constatada através do colóquio, ocorrido em 1974, para comemorar o sesquicentenário de “*Reflexões*”, CNRS (1976), e que contou com a presença de Ilya Prigogine, cujo falecimento ocorreu em maio de 2003, conforme anunciado no Jornal da SBPC (2003).

O ciclo de Carnot, idéia chave da obra de Carnot, é constituído de duas transformações isotérmicas, uma de expansão, com o calor sendo recebido, e outra de compressão, com o calor sendo rejeitado, e de duas adiabáticas ideais, chamadas de isentrópicas, uma de expansão e a outra de compressão. Neste ciclo ideal, todas as transferências de calor do corpo quente para o sistema (fluido de trabalho) e do sistema para o corpo frio acontecem sem diferenças finitas ou saltos de temperatura; e todas as mudanças de temperatura ocorrem sem contato térmico entre o sistema e o corpo frio ou quente (Prigogine e Kondepudi, 1999; Carnot, 1987; Dugdale, 1996; Passos, 2002).

Apesar do pioneirismo de Carnot, o seu trabalho ficou esquecido durante dez anos, até ser analisado em um artigo de Clapeyron (1834). Hoje, os textos de termodinâmica (Van Wilen et al., 1998; Çengel e Boles, 1994; Moran e Shapiro, 1995) fazem menção aos principais resultados de Carnot, ao apresentarem a segunda lei. No entanto, a síntese desses resultados

não nos permite entender a lógica adotada por Carnot (1824) e nem como foram suplantadas as limitações de conhecimento da época, em que prevalecia o empirismo das máquinas térmicas. Os avanços na termodinâmica como ciência vieram a reboque dos avanços e inovações tecnológicos das máquinas térmicas, Passos (2002).

O objetivo neste artigo é tentar contribuir para o ensino técnico da termodinâmica, quando nos deparamos com os conceitos da segunda lei e tentar encontrar uma ponte entre o ensino moderno da segunda lei e as suas origens. Pretende-se, através de uma revisão fundamentada no livro de Carnot e em outros textos, responder a algumas das dúvidas colocadas pelos estudantes ou pelo docente. O presente artigo é uma continuação do estudo apresentado por Passos (2002), onde foram analisados os contextos históricos envolvendo a vida e a obra de Carnot e os avanços da Termodinâmica cujo ciclo ideal de Carnot representa um marco importante.

2. DA OBRA DE CARNOT

2.1 A necessidade de uma nova teoria

Carnot (1824) inicia o seu ensaio considerando os avanços das máquinas térmicas, na Inglaterra, chamadas à época de máquinas de fogo e, na página 6, ele assim colocou o problema objeto de seu estudo:

“Malgré les travaux de tous genres entrepris sur les machines à feu, malgré l'état satisfaisant où elles sont aujourd'hui parvenues, leur théorie est fort peu avancée, et les essais d'améliorations tentés sur elles sont encore dirigés presque au hasard.”

Tradução: *“Apesar dos trabalhos de todos os gêneros empreendidos sobre as máquinas “a fogo”, apesar do estado satisfatório que hoje em dia as mesmas alcançaram, a sua teoria é limitada, e as tentativas de aperfeiçoamento delas ainda são conduzidas quase que por acaso”.*

No texto, acima, fica clara a preocupação de Carnot em desenvolver o seu estudo através de uma metodologia científica, onde o *quase por acaso* desse lugar a um procedimento metodológico, inclusive com o suporte matemático. Um aprofundamento das motivações de Carnot à realização do seu ensaio exigiria uma análise sobre o pensamento filosófico e político da época de 1800, bem como sobre os acontecimentos políticos. Ressalte-se a precocidade de Carnot que aos dezesseis anos de idade ingressa na Escola Politécnica da França, já à época a principal escola da elite francesa. Particularmente, o seu interesse pelas máquinas térmicas já é bastante grande, uma vez que no mesmo ano em que ingressa na Escola Politécnica, ele também traduz um artigo *“sobre a máquina a vapor de James Watt”*, ver Fox (1976). Taton (1974) levantou dados sobre a formação científica de Carnot, no primeiro ano de Escola Politécnica, no ano escolar de 1812-1813, e verificou que 25% do tempo era consagrado ao estudo de análise matemática, 18% à mecânica, 23 % à geometria descritiva, 12% à química geral e aplicada, 7% à física e 2% à análise infinitesimal. Portanto, Carnot pôde adquirir uma sólida formação científica e o seu aproveitamento, em vigésimo lugar de uma turma de 179 alunos, mostra bem que era um estudante bastante aplicado e dedicado.

Continuando a leitura de Carnot (1824), págs. 8 e 9, pode-se constatar que ele enxergava longe quando dizia que eram necessários novos conhecimentos para se analisar as máquinas cujo movimento dependiam do calor, diferente das outras máquinas comuns, à época, em que o movimento era baseado no esforço humano ou animal, na queda d'água ou na corrente de ar. Vejamos como Carnot escreveu isto:

“Les machines que ne reçoivent pas leur mouvement de la chaleur, celles qui ont pour moteur la force des hommes ou des animaux, une chute d’eau, un courant d’air, etc., peuvent être étudiées jusque dans leurs moindres détails par la théorie mécanique. Tous les cas sont prévus, tous les mouvements imaginables sont soumis à des principes généraux solidement établis et applicables en toute circonstance. C’est là le caractère d’une théorie complète. Une semblable théorie manque évidemment pour les machines à feu. On ne la possédera que lorsque les lois de la physique seront assez étendues, assez généralisées, pour faire connaître à l’avance tous les effets de la chaleur agissant d’une manière déterminée sur un corps quelconque.”

Tradução: *“As máquinas que não recebem o seu movimento do calor, aquelas cujo motor é a força dos homens ou dos animais, uma queda d’água, uma corrente de ar, etc., podem ser estudadas, até no mínimo detalhe, pela teoria mecânica. Todos os casos são previstos, todos os movimentos imagináveis estão submetidos a princípios gerais solidamente estabelecidos e aplicáveis em qualquer situação. Isto caracteriza uma teoria completa. Uma teoria semelhante falta, evidentemente, às máquinas de fogo. Não se alcançará que quando as leis da física forem suficientemente abrangentes, suficientemente generalizadas, para fazer conhecer previamente todos os efeitos do calor atuando de uma maneira determinada sobre um corpo qualquer.”*

No texto, acima, percebe-se que Carnot possuía pleno conhecimento do *estado da arte* da Mecânica e sabia das limitações da ciência da época para permitir uma análise detalhada do funcionamento de uma máquina a vapor.

Um ponto que merece uma análise detalhada, na obra de Carnot (1824), é o calórico. Em várias passagens ele considera o problema do restabelecimento do equilíbrio do calórico como essencial ao movimento nas máquinas a vapor. No caso do vapor como fluido de trabalho, ele afirma que o papel do vapor é transportar o calórico. Vejamos um pouco melhor como foi colocada esta idéia por Carnot, à pág. 9.

“La production du mouvement dans les machines à vapeur est toujours accompagnée d’une circonstance sur laquelle nous devons fixer l’attention. Cette circonstance est le rétablissement d’équilibre dans le calorique, c’est-à-dire son passage d’un corps où la température est plus au moins élevée à un autre où elle est plus froide.”

Tradução: *“A produção do movimento nas máquinas a vapor é sempre acompanhado de uma circunstância sobre a qual nós devemos prestar atenção. Esta circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico, ou seja a sua passagem de um corpo em que a temperatura é mais ou menos elevada a um outro em que ela é mais fria.”*

Mais adiante, às páginas 10 e 11 de “Réflexions”, lê-se:

“A produção da potência motriz, nas máquinas a vapor, é, portanto, devida não a um consumo real do calórico mas ao seu transporte de um corpo quente a um corpo frio, ou seja ao seu restabelecimento do equilíbrio, equilíbrio este suposto rompido por qualquer causa, pela ação química, como a combustão, ou por qualquer outra”.

“... de acordo com este princípio, não basta, para dar origem à potência motriz, produzir o calor: é necessário ainda obter o frio; sem ele o calor seria inútil”.

2.2 Objetivos e proposição geral

Objetivos

Os objetivos do estudo de Carnot foram apresentados, à página 15 de seu ensaio:

“L’on dispose, par exemple, d’un corps A, maintenu à la température 100°, et d’un autre corps B, maintenu à la température 0°, e l’on demande quelle quantité de puissance motrice peut naître par le transport d’une portion donnée de calorique (par exemple celle qui est nécessaire pour fondre um kilograme de glace) du premier de ces corps au second; on demande si cette quantité de puissance motrice est nécessairement limitée, si elle varie avec la substance employée à la réaliser, si la vapeur d’eau offre à cet égard plus ou moins d’avantage que la vapeur d’alcool, de mercure, qu’un gaz permanent ou que toute autre substance.”

A partir do trecho, acima, pode-se resumir os objetivos do ensaio:

Dispondo-se de um corpo A mantido a 100°C e de um corpo B mantido a 0°C, pergunta-se :

- a) Qual é a quantidade de potência motriz que pode surgir através do transporte de uma determinada quantidade de calor (ou calórico) de A para B ?
- b) A quantidade de potência motriz produzida é necessariamente limitada ?
- c) A quantidade de potência motriz produzida varia com a substância empregada?

Proposição geral

À página 38, Carnot apresenta a seguinte proposição geral:

“La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en oeuvre pour la réaliser; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique.”

Tradução:

“A potência motriz do calor é independente dos agentes colocados para sua realização; a sua quantidade depende unicamente das temperaturas dos corpos entre os quais ocorre o transporte do calórico.”

Comprovação dos resultados

Em seu ensaio, Carnot passa grande parte do texto a demonstrar que durante uma expansão ou compressão isotérmicas o trabalho (força motriz) produzido não depende da substância de trabalho.

2.3 Dificuldade a ser vencida

A passagem, a seguir, extraída de Carnot (1824), página 42, mostra as dificuldades que tiveram de ser enfrentadas por Carnot em seu estudo do calor, em uma época em que os conhecimentos sobre a termodinâmica ainda eram rudimentares.

“La quantité de chaleur que les fluides élastiques dégagent ou absorbent dans leurs changements de volume n’a jamais été mesurée par aucune expérience directe, expérience qui offrirait sans doute de grandes difficultés; mais il existe une donnée qui est à peu près l’équivalent pour nous: cette donnée a été fournie para la théorie du son; ...”

Tradução: *“A quantidade de calor que os fluidos elásticos liberam ou absorvem em suas mudanças de volume nunca foram medidas por nenhuma experiência direta, experiência que ofereceria sem dúvida, grandes dificuldades; mas existe um dado que é mais ou menos o equivalente para nós: este dado foi fornecido pela teoria do som;”*

2.4 Um Ciclo ideal com produção de trabalho

A Figura 1a, extraída de Carnot (1824), mostra um cilindro equipado com pistão, contendo um gás. Com o pistão na posição ik o cilindro é colocado em contato com um corpo B, à temperatura T_B , do qual o gás recebe calor em quantidade suficiente para expandir-se até

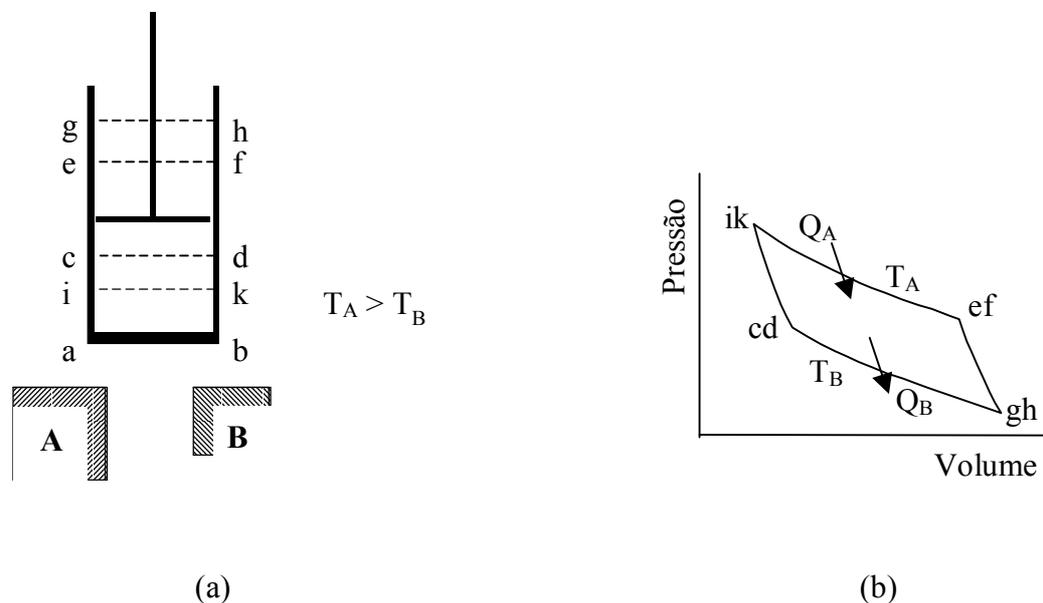


Figura 1. (a) Experimento teórico de um ciclo ideal com produção de trabalho (Figura 1 de Carnot, 1824); (b) Representação de Clapeyron do ciclo de Carnot.

o volume ab-ef com a sua temperatura igual T_A menos um infinitésimo, quando então o cilindro é afastado do corpo A e completamente isolado do exterior. O gás continua a se expandir, de forma adiabática, até o volume ab-gh quando, então, é colocado em contato com o corpo B, à $T_B < T_A$. Com o pistão em gh a temperatura do gás está um infinitésimo acima de T_B , e assim permanece enquanto se contrai, mediante a transferência de calor para B, até o volume ab-cd. Nesta posição, o cilindro é afastado de B e mantido isolado do exterior enquanto o gás sofre nova contração adiabática até o volume ab-ik, quando, novamente, o cilindro é colocado em contato com o corpo A e um novo ciclo é iniciado. A diferença infinitesimal de temperatura entre o gás e o corpo A ou B torna o processo de expansão ou compressão reversível. Na prática, isto equivale a um processo bastante lento ou ter uma superfície de contato entre o corpo A, ou B, e o cilindro com área infinita, Van Wylen et al. (1997).

A Figura 1b mostra em um diagrama p-V (pressão contra volume) o mesmo ciclo descrito em palavras, com o apoio do esquema da Figura 1a, apresentado em Carnot (1824). A Figura 1b foi apresentada por Clapeyron (1834), em um estudo no qual é feita uma tradução analítica das operações descritas por Carnot.

2.5 Um Ciclo ideal com pequena diferença de temperatura

A Figura 2a também foi extraída de Carnot (1824). Neste caso, as temperaturas de A e B são consideradas muito próximas, $T_A = T_B + \delta T$. Inicialmente, o cilindro contém gás ocupando o volume ab-cd, quando é colocado em contato com a fonte de calor à T_A . O gás é mantido à

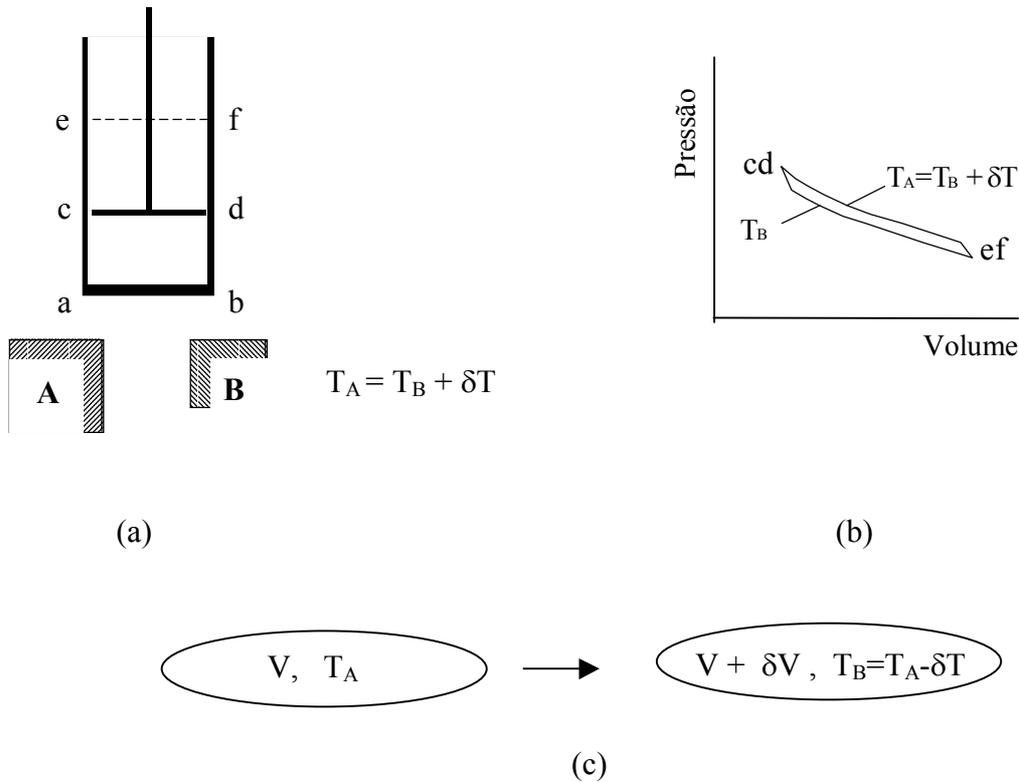


Figura 2. (a) Experimento teórico de um ciclo ideal para o ar atmosférico, com T_A e T_B muito próximas (Figura 2 de Carnot, 1824); (b) Representação do ciclo descrito por Carnot; (c) Afastamento do cilindro do corpo A e contato com o corpo B.

T_A enquanto o pistão se move da posição cd para a posição ef . Em seguida, o cilindro é afastado de A e colocado em contato com o corpo B, permitindo que o pistão volte à posição cd , com o gás sempre à T_B mais um infinitésimo. O cilindro é afastado de B e colocado, novamente, em contato com A, permitindo o movimento do pistão, com o gás a T_A , da posição cd para ef , e o início de um novo ciclo. Embora, no exemplo da Figura 2, Carnot tenha se referido ao ar, em seu livro à página 37 ele também informa que o mesmo experimento poderia ser realizado com qualquer outra substância gasosa. A partir destes exemplos simples Carnot prova que a quantidade de calórico necessária é sempre a mesma independentemente do tipo de gás empregado.

Na Figura 2b, representa-se o ciclo descrito por Carnot, conforme o esquema da Figura 2a, na forma de um gráfico p - V , este não tendo sido representado por Carnot. Na Figura 2c é mostrado um esquema para as variações de temperatura e de volume do gás quando, com o pistão na posição ef , o cilindro é afastado do corpo A e colocado em contato com o corpo B.

2.6 Requisitos da termodinâmica ou calorimetria

Como se verá nos itens seguintes, para que muitos das deduções de Carnot pudessem ser provadas era preciso valer-se dos conhecimentos já acumulados em termodinâmica.

Leis dos gases

Nos séculos XVII a XIX, a partir de estudos experimentais foram descobertas várias leis para os gases. Estas leis de origem empírica foram estabelecidas a partir de estudos sobre o comportamento dos gases a pressões próximas da atmosférica.

Robert Boyle, em 1662, e E. Mariotti, em 1676, de forma independente, (Kirillin et al., 1976; Ronan, 1987; Prigogine e Kondepudi, 1999) demonstraram que para uma transformação isotérmica, o produto da pressão vezes o volume do gás é uma constante:

$$pV=Cte \quad (1)$$

Gay Lussac, em 1802, demonstrou que os gases (foram testados alguns gases) quando submetidos a uma transformação isobárica sofrem uma expansão cujo volume é diretamente proporcional à temperatura:

$$V = V_0(1 + \alpha T) \quad (2)$$

onde V_0 e α representam o volume do gás a 0°C e o coeficiente de dilatação volumétrica, respectivamente, Prigogine e Kondepudi (1999). Na época de Carnot, o valor de α era $1/267=0,003745 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, hoje este valor é $1/273,15=0,003661 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

As equações (1) e (2) combinadas fornecem a equação dos gases ideais, com o valor de α , à época de Carnot:

$$pv=R(267 + T) \quad (3)$$

3. Demonstrações

3.1 Trabalho produzido no ciclo

Para um gás perfeito realizando uma transformação isotérmica, $pV=Cte$, os trabalhos de expansão e compressão dependem dos volumes inicial e final e da temperatura absoluta, conforme demonstrado, a seguir, utilizando as indicações da Figura 1:

$${}_{ik}W_{ef} = \int_{ik}^{ef} p dV = C \int_{V_{ik}}^{V_{ef}} \frac{dV}{V} = p_{ik} V_{abik} \ln\left(\frac{V_{abef}}{V_{abik}}\right) = mRT_A \ln\left(\frac{V_{abef}}{V_{abik}}\right) \quad (4)$$

$${}_{gh}W_{cd} = \int_{gh}^{cd} p dV = C \int_{V_{gh}}^{V_{cd}} \frac{dV}{V} = p_{gh} V_{abgh} \ln\left(\frac{V_{abgh}}{V_{abcd}}\right) = mRT_B \ln\left(\frac{V_{abgh}}{V_{abcd}}\right) \quad (5)$$

Para as transformações adiabáticas reversíveis, de acordo com as indicações, na Figura 1, tem-se:

$${}_{ef}W_{gh} = \frac{p_{gh} V_{abgh} - p_{ef} V_{abef}}{1 - k} = \frac{mR(T_A - T_B)}{1 - k} \quad (6)$$

$$W_{ik}^{cd} = \frac{mR(T_B - T_A)}{1 - k} \quad (7)$$

$$c_p - c_v = R \quad (8)$$

e

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (9)$$

Onde R é a constante do gás, c_p e c_v representam os calores específicos à pressão e a volume constantes, respectivamente. Como a soma dos trabalhos de compressão e expansão adiabáticas, para uma transformação reversível, é zero, tem-se:

$$W_{ciclo} = W_{ef} + W_{cd} = Q_A + Q_B \quad (10)$$

O rendimento do ciclo é:

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_A} = 1 - \frac{T_B}{T_A} \quad (11)$$

onde T_A e T_B representam as temperaturas absolutas. A Equação (11) não aparece no trabalho de Carnot (1824) e os conceitos de temperatura absoluta só foram formulados após a sua morte. A Equação (11) mostra que o rendimento de um ciclo ideal, ou rendimento máximo, depende apenas da razão entre as temperaturas absolutas T_B e T_A e independe da substância empregada.

3.2 Demonstração de Carnot

De posse dos dados disponíveis, à época, Carnot calculou a potência motriz produzida por três substâncias operando entre as temperaturas T_A e T_B , a partir de uma mesma quantidade de calor recebida do corpo à temperatura T_B . É importante observar que ainda não existia o conceito de temperatura absoluta.

Por exemplo, considerando um 1 kg de água líquida ocupando o volume ab-cd, ver Figura 2, em contato com um corpo a 100°C, e que sofre uma expansão até o volume ab-ef devido à vaporização de todo o líquido. Neste ponto, o cilindro é afastado do corpo A e colocado em contato com um corpo B, à 99°C. Enquanto em contato com o corpo B, o vapor é liquefeito enquanto ocorre a redução de volume até que o pistão atinja a posição cd, quando o cilindro é afastado de B e de novo colocado em contato com A, iniciando um novo ciclo. A Figura 3 mostra o ciclo em um diagrama p-V, representativo das transformações descritas por Carnot.

O trabalho (W), ou potência motriz como escreveu Carnot, à p. 83 do ensaio, produzido em ciclo completo é igual ao produto da variação de volume ΔV pela diferença de pressão Δp , $W = \Delta V \cdot \Delta p$. Utilizando as propriedades da água saturada fornecidas em Sonntag et al. (1998)

obtem-se $W=5,8$ kJ. Carnot sabia que a vaporização de 1kg de água líquida a 100°C requeria 550 unidades de calor e que o volume ocupado por 1kg de vapor d'água à pressão atmosférica era 1700 litros e a diferença das pressões de saturação correspondentes a 100 e a 99°C equivalia a 0,36 m de coluna de água. Assim o trabalho produzido era igual a 0,611 unidades ($=1,7 \times 0,36$) que, em unidades do SI corresponde a 5,7 kJ, bem próximo do valor atual, conforme valor mostrado, acima. Na Tabela 1, são fornecidos os valores do trabalho produzido para o ar, água e álcool, em função das temperaturas T_A e T_B , conforme apresentado por Carnot (1824).

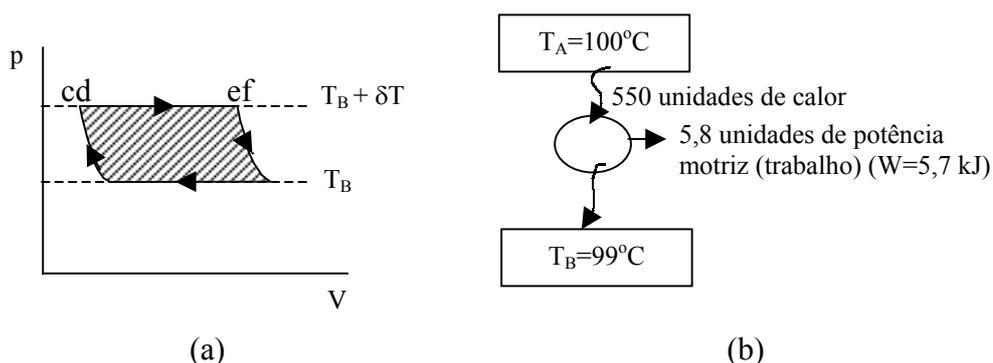


Figura 3: Representações gráficas do exemplo de Carnot
(nenhuma destas representações aparece no trabalho de Carnot (1824))

Carnot tratou de superar as limitações dos dados da sua época por meio de extrapolações dos resultados para água para as temperaturas equivalentes aos dados para o ar, entre 1 e 0°C , e para o álcool, entre 78 e 77°C . Assim, para substâncias diferentes e partindo dos mesmos níveis de temperaturas e de unidades de calor recebido (1000 uc) obtém-se valores próximos de unidades trabalho, por exemplo 1,212 e 1,230 ut, quando $T_A=78^{\circ}\text{C}$ e $T_B=77^{\circ}\text{C}$, para a água e o álcool, e de forma análoga, quando se comparam as unidades de trabalho para a água e o ar entre as temperaturas de 1 e 0°C . Os resultados resumidos, na Tabela 1, permitiram a

Tabela 1: Dados obtidos nos cálculos de Carnot

Substância	Temperaturas	Unidades de calor (uc)	Unidades de trabalho (ut)
Ar	$T_A=1^{\circ}\text{C}$, $T_B=0^{\circ}\text{C}$	1000	1,395
Água	$T_A=100^{\circ}\text{C}$, $T_B=99^{\circ}\text{C}$	550	0,611
	$T_A=78^{\circ}\text{C}$, $T_B=77^{\circ}\text{C}$	1000	1,212
	$T_A=1^{\circ}\text{C}$, $T_B=0^{\circ}\text{C}$	1000	1,290
Álcool	$T_A=78,7^{\circ}\text{C}$, $T_B=77,7^{\circ}\text{C}$	207	0,254
		1000	1,230

Carnot demonstrar, em primeira aproximação, devido às limitações existentes em sua época, que partindo da mesma quantidade de calor (unidades de calor) produzia-se a mesma quantidade de trabalho (potência motriz), independentemente da substância. Este resultado,



juntamente com um exercício de lógica sobre a impossibilidade de se criar energia do nada (moto contínuo), forneceram as respostas às perguntas apresentadas, no item 2.2:

a) De acordo com a Tabela 1, para o ar, a água e o álcool, foram obtidos valores do trabalho muito próximos para o mesmo valor de unidades de calor.

b) Para um ciclo em que a expansão ou compressão da substância ocorre, isotermicamente, devido à mudança de volume, e sem diferenças finitas de temperatura entre a substância e os corpos frio e quente e no qual as variações de temperatura ocorrem sem contato térmico, produzem o máximo de trabalho.

c) O trabalho produzido não depende da substância empregada.

Os resultados obtidos por Carnot foram, posteriormente analisados de forma geral através de formulações matemáticas, ver item 3.1, que possibilitaram um considerável avanço da ciência, de que a potência motriz seria, apenas, função das temperaturas T_A e T_B e independente dos fluidos de trabalho.

Ao término destas análises, Carnot escreve, à página 89:

“La loi fondamentale que nous avions en vue de confirmer nous semblerait exiger cependant, pour être mise hors de doute, des vérifications nouvelles; elle est assise sur la théorie de la chaleur telle qu’on la conçoit aujourd’hui, et, il faut l’avouer, cette base ne paraît pas d’une solidité inébranlable.”

Tradução:

“A lei fundamental que nós prevíamos confirmar parece-nos exigir, no entanto, novas verificações, ela é baseada sobre a teoria do calor tal como a concebemos hoje e, é obrigatório reconhecer, esta base é de uma solidez duvidosa.”

E conclui (p. 89) sobre a necessidade de novas experiências e verificações.

4. CONCLUSÃO

A leitura da obra de Carnot traz à tona as dificuldades para que o autor submetesse à prova os enunciados que se propunha demonstrar devido aos conhecimentos reduzidos de vários dos temas que formam a base do ciclo ideal proposto. Apesar dessas dificuldades e utilizando grande abstração, os resultados foram demonstrados com o auxílio de aproximações que o espírito de engenheiro anteviu como aceitáveis apesar de ainda necessitarem de mais comprovações. É interessante observar que o conceito de calórico que, posteriormente, foi considerado equivocado representou uma idéia chave no trabalho de Carnot.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARNOT, S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres à Developper cette Puissance.** in R. Fox. Reprodução do trabalho original de Sadi Carnot, 1824.

CARNOT, S. **Reflexiones sobre la Potencia Motriz del Fuego y sobre las Máquinas Adecuadas para Desarrollar esta Potencia y otras Notas de Carácter Científico.** Introduction, Traduction y Notas de Javier Odon Ordóñez, Alianza Editorial, Madrid, 1987.

ÇENGEL, Y. A. AND BOLES, M.A. **Thermodynamics: An Engineering Approach.** 2nd ed., McGraw-Hill, Ch. 5, 1994.



- CLAPEYRON, E. **Memoir on the Motive Power of Heat.** pp. 73-105, Ed., E. Mendoza, 1834.
- CNRS. **Table Ronde du Centre National de la Recherche Scientifique: Sadi Carnot et l'Essor de la Thermodynamique.** École Polytechnique – 11-13, juin 1974, Éditions du CNRS, Paris, 1976.
- 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.** Moscú: Editorial Mir, 1976.
- MORAN, M. J. AND SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** 3rd ed., John Wiley & Sons, Ch. 5, 1995.
- PASSOS, J.C. Em torno de Carnot e sobre a segunda lei da termodinâmica. In CONEM-2002, CD-ROM, 2002. p. 1-10.
- PRIGOGINE, I. ET KONDEPUDI, D. **Thermodynamique: Des moteurs thermiques aux structures dissipatives.** Ed. Odile Jacob. Pág. 58, 1999.
- RONAN, C.A. **História Ilustrada da Ciência.** São Paulo: Circulo do Livro, Vol. III, p. 120-121. 1987
- SBPC. **Jornal da SBPC.** Maio, 2003.
- TATON, R.. **La Formation de Sadi Carnot: École Polytechnique et École de Metz.** in CNRS. Table Ronde du Centre National de la Recherche Scientifique: Sadi Carnot et l'Essor de la Thermodynamique. École Polytechnique – 11-13, juin 1974. Paris: Éditions du CNRS, 1976.
- VAN WYLEN, G., SONNTAG, R., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica,** Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1997.

THE IMPORTANCE OF CARNOT'S WORK FOR THE TEACHING OF THERMODYNAMICS

Abstract: *This paper draws on an essay by Sadi Carnot as its main source of research material, and seeks to reconstruct the main ideas related to the ideal cycle proposed by the author, which served as a basis for the development of thermodynamics as a science. A comparison is drawn with the contents that is taught today on the thermodynamics courses for engineers. This re-reading shows some strategies of the scientific method employed by Carnot which allowed him to overcome limitations in the knowledge on thermodynamics, at the beginning of the nineteenth century, and to obtain the scientific proof for theses never proposed and which today are considered the basis for the second law of thermodynamics.*

Keywords: *Thermodynamics, Carnot's cycle, Second law, Engineering education*