

# SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

João Batista de Oliveira Júnior<sup>1</sup>

Isac Soares dos Santos<sup>2</sup>

Raimundo Carlos Rezende Santana<sup>3</sup>

Gezrell Santos Alves<sup>4</sup>

Nelson Antonio Sá Santos<sup>5</sup>

Engenharia Elétrica



cadernos de  
graduação

ciências exatas e tecnológicas

ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

## RESUMO

As leis da termodinâmica foram obtidas a partir da busca de cientistas para encontrar explicações sobre as funções teóricas das máquinas de calor e como maximizar seu desempenho. Muitos cientistas deram grandes contribuições para o desenvolvimento da termodinâmica como uma ciência e hoje trata-se de um ramo da física com bastante destaque por estar relacionada a fenômenos cotidianos vivenciados por todos. O objetivo deste artigo é discorrer a respeito do conceito dessa lei, através da análise bibliográfica de obras publicadas, bem como identificar como está acontecendo o aprendizado desse tema por professores e alunos.

## PALAVRAS-CHAVE

Física. Termodinâmica. Calor.

## ABSTRACT

The laws of thermodynamics were obtained from the search of scientists to find explanations about the theoretical functions of heat machines and how to maximize their performance. Many scientists have made great contributions to the development of thermodynamics as a science and today it is a branch of physics with a lot of prominence because it is related to everyday phenomena experienced by everyone. The purpose of this article is to discuss the concept of this law, through the bibliographic analysis of published works, as well as to identify how teachers and students are learning about this theme.

## KEYWORDS

Physics. Thermodynamics. Heat.

## 1 INTRODUÇÃO

Termodinâmica é a ciência que trata da conversão de energia e pode ser analisada a partir de suas leis básicas. A primeira lei da termodinâmica estipula que, em qualquer processo encontrado na natureza, a energia é sempre conservada sendo a base para entender o calor e o trabalho como processos.

A segunda lei, por meio de sua afirmação determina a assimetria fundamental na natureza (FERRACIOLI, 2001). A combinação da primeira e segunda leis termodinâmicas mostra que embora a energia total deva ser preservada em qualquer processo, a distribuição da mesma é irreversivelmente alterada (FERRACIOLI 1994).

De maneira mais simples, podemos dizer que a segunda lei está essencialmente relacionada a fenômenos cotidianos como o gás em seu processo de expansão, a indução do calor gerada pela fricção ou resfriamento de objetos quentes ao ar livre, entretanto a literatura disponível a respeito do tema induz alunos e professores a nem sempre ter uma compreensão real dessa relação.

Desta forma, o objetivo deste estudo é investigar como a Segunda Lei da Termodinâmica é disponibilizada na literatura, analisando artigos e livros publicados a respeito da matéria, bem como de que forma a mesma pode ser entendida por professores e alunos a fim de absorver este conhecimento.

## 2 MÉTODO

A metodologia utilizada na elaboração do assunto deste artigo foi a pesquisa bibliográfica, que, segundo Lakatos e Marconi (2003), são informações e documentações obtidas na coleta de materiais publicados, como livros, teses, boletins, dissertações entre outros.

### 3 CONTEXTO HISTÓRICO

O ensino da Termodinâmica tem apresentado certa dificuldade de compreensão, principalmente no tocante a segunda lei, o qual não se aplica apenas aos alunos, mas também aos professores, diferente da primeira lei, onde é mais facilmente compreendido o aspecto qualitativo da conservação da energia.

Nesse sentido, o desenvolvimento histórico das máquinas térmicas torna-se um importante fator de estudo que podem contribuir para um melhor entendimento da matéria, sendo possível até mesmo inserir formas de exercício com cálculo de rendimentos das primeiras máquinas térmicas.

Com isso em mente apresentaremos no Quadro 1, um breve resumo histórico, demonstrando algumas descobertas importantes na área de tecnologia, marcados por inovações nas máquinas térmicas.

Quadro 1 – Datas e acontecimentos importantes

Ano	Autor	Fato e Comentário	Fonte
1698	Thomas Savery (1650-1715)	Mostre a Guilherme III sua invenção. Inventor de uma máquina que consiste em uma caldeira e um reservatório para retirar a água que adentrava nas minas de cobre.	Mantoux (1980)
1705 ou 1706	Thomas Newcomen (1663-1729)	Apresentou várias melhorias em sua máquina até que ela alcançou sua forma prática em 1720, conservada com poucas por mais de um século.	Mantoux (1980)
1769	James Watt (1736-1819)	Foi o solicitante da primeira patente máquinas a vapor.	Mantoux (1980) e Sproule (1993)
1774	James Watt (1736-1819)	Deixa seu país de origem, a Escócia, e vai para Birmingham-Inglaterra, onde associa-se a Matthew Boulton e passam a ser fabricantes de máquina a vapor.	Sproule (1993)
1783	Lazare Carnot (1753-1823)	Publicou o livro "Ensaio sobre as máquinas em geral", no qual discutia como fazer com que as máquinas tivessem funções ideais.	Fox (1978)
1800	James Watt (1736-1819)	Neste período expira a patente da máquina de Watt e termina sua sociedade com Watt.	Sproule (1993)
1822	Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830)	Publica a Teoria Analítica do Calor.	Fox (1978)

Ano	Autor	Fato e Comentário	Fonte
1824	Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)	600 exemplares do livro "Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas adequadas ao desenvolvimento dessa potência" são publicados.	Fox (1978)
1834	Benoît Paul Emile Clapeyron (1799-1864)	Publicação de artigo, no Jornal da Escola Politécnica – França, representando o ciclo descrito por Carnot para um gás, no diagrama pressão-volume (p x V)	Prigogine e Kondepudi (1999), Bejan (1988)
1848	William Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907)	Propõe uma escala absoluta de temperatura, derivada dos conceitos de Carnot	Dugdale (1996)
1854	William Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907)	Propõe nova escala absoluta (hoje escala KELVIN)	Prigogine e Kondepudi (1999)
1860	Rudolf Clausius (1822-1888)	Apresenta o conceito de Entropia	Dugdale (1996)
1865	Rudolf Clausius (1822-1888)	Apresenta a grandeza entropia	Prigogine e Kondepudi (1999)

Fonte: Autores (2021).

É interessante perceber que apesar da segunda lei ser apresentada em livros e cursos após a primeira, as duas acabaram aparecendo ao mesmo tempo, próximo ao ano de 1850 (BEJAN, 1988). O mesmo autor menciona que princípio da conservação de energia, bem conhecido na mecânica, é muito mais antigo, embora a primeira lei da termodinâmica seja uma aplicação do mesmo.

Com esse breve histórico em mente, passaremos a dissertar acerca dos conceitos e compreensão desse tema.

### 3 SEGUNDA LEI DA TERMODINAMICA

A segunda lei da termodinâmica é uma das estruturas de pensamento científico mais interessantes de todos os tempos. Desde a primeira formulação, ainda no século 19 sempre houve uma discussão acalorada entre cientistas de diferentes origens a respeito de seu entendimento.

Apesar de sua atenção está focada no sistema macro, às vezes, e de forma até mesmo abusiva, vem sendo aplicada em fenômenos sociais, produzindo explicações que podemos classificar como perigosas.

De uma perspectiva macro, a segunda lei da termodinâmica pode ser entendida como a lei da evolução, no sentido de definir a seta do tempo. Ele define um processo reversível que continua a ocorrer no universo em evolução equilibrada e irreversível no universo em degradação, ou seja, no curso da evolução, a energia útil disponível no universo será sempre menor que o momento anterior.

A energia útil significa energia que pode se converter em trabalho e o grau de declínio de energia útil ou irreversibilidade deste processo é realizado alterando a sua entropia do universo. Neste contexto, o termo “universo” deve ser explicado como um sistema enorme, mas limitado, isolado e de no qual, dentro do qual encontramos um menor, onde acontecem os processos reversíveis ou irreversíveis.

Esta lei implica que, após algum processo, a entropia do universo é sempre maior ou igual a zero. Casos de igualdade ocorreram em processo reversível, a qual é a única situação em que a termodinâmica permite reverter o tempo, da mesma maneira que ocorre na micromecânica, quando esses processos ocorrem com deslocamento contínuo e quase estático do estado do equilíbrio do sistema, juntamente com o resto do universo, para que assim seja mantida a entropia total constante.

Dentre as várias formulas que encontramos para expressar a segunda lei, todas elas sendo equivalentes, tomaremos como base para este trabalho a proposta por Kelvin, que indica não haver nenhum processo que extraia calor de uma fonte e o converta completamente em trabalho útil não tendo nenhum outro impacto no restante do universo.

Esta última afirmativa do parágrafo acima significa dizer que o sistema deve ser restaurado ao seu estado original, ou seja, o processo deve ser reversível. Portanto, estamos falando de um processo em ciclo. Desta maneira é possível concluir que uma máquina térmica cíclica capaz de remover o calor de um lugar de reserva e converter completamente o mesmo em trabalho. Com base nisso, a seguinte inferência pode ser traçada, a saber, o teorema de Carnot.

O raciocínio do físico Sadi Carnot, afirmado em seu artigo *Sur la puissance motrice do feu* (Sobre a potência motriz do fogo) em 1824, impõe um limite à eficiência da máquina de calor ideal. Nele podemos notar que não há influência do atrito entre componentes ou energia emitida na forma de som (CARNOT, 1824).

Nesse sentido, a máquina térmica ideal é a de Carnot, porque está originalmente associada ao princípio variacional e por maximizar o ganho (isto é, o trabalho que pode ser feito) sem alterar a entropia do universo. A máquina de Carnot possui mais atributos do que qualquer outra máquina reversível, pois estabelece um limite de rendimento sem comprometer a reversibilidade do processo e reduzir a energia útil, cada ciclo de trabalho desta forma tem um limite máximo.

Teoricamente falando, uma pergunta surgirá naturalmente: uma vez que a conversão periódica do calor em trabalho não pode ser total, qual é a produção máxima permitida? Carnot, o pioneiro desta pesquisa temática, descreveu o ciclo que define a produção máxima:

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Fonte: Parisi (2002).

O ciclo pode ser definido de maneira muito simples. A primeira etapa envolve a manutenção do equilíbrio térmico entre o equipamento e a fonte de calor enquanto o vapor se expande do estado comprimido A para o expandido B e realiza trabalho mecânico. Durante toda essa etapa, o vapor e a fonte de alimentação são mantidos na mesma temperatura  $T_1$ . Para atingir a eficiência máxima exigida, é necessário um equilíbrio térmico, caso contrário, se a temperatura do vapor for baixa, o processo será irreversível e afetará o rendimento.

Antes de prosseguir para a próxima etapa devemos destacar alguns comentários importantes sobre a etapa anterior. A grandeza da termodinâmica básica da segunda lei é a entropia  $S$ , definida indiretamente por meio de pequenas mudanças:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Fonte: Oliveira e Dechoum (2003).

Em qualquer processo reversível a temperatura  $T$  do sistema pode ser considerada como uma temperatura inalterada. A troca de calor ( $dQ$ ) entre o sistema e o ambiente também é ilimitada. Se o sistema receber calor ( $dQ$  positivo) do meio ambiente, a entropia  $S$  do sistema aumentará, caso contrário, diminuirá. Para um processo reversível finito (não infinitesimais), a mudança da entropia pode ser obtida integrando a equação:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Fonte: Nussenzveig (1996).

Essa tarefa matemática pode não ser fácil, dependendo de como a temperatura  $T$  muda ao longo do caminho de integração. Em alguns casos, isso é simples. Por exemplo, na primeira etapa do ciclo de Carnot, a temperatura  $T_1$  é mantida constante e pode ser destacada na integração. O resultado é apenas o calor total absorvido pelo vapor  $Q_1$ , que é o desprendimento energético para nos fornecer trabalho mecânico. Neste caso, podemos demonstrar esse desprendimento com a equação abaixo:

$$Q_1 = T_1 \Delta S = T_1 (S_B - S_A)$$

Fonte: Eisberg & Lerner (1983).

O resultado dessa integração é mais trivial: como o calor trocado é zero, a entropia do vapor não muda em nada. Assim como a temperatura  $T_1$  permanece constante na primeira etapa do ciclo de Carnot, a entropia também não muda. Portanto, a segunda etapa do ciclo de Carnot é uma transformação isoentrópica.

Ao dar prosseguindo para a terceira etapa do ciclo de Carnot, onde o vapor é comprimido do estado C de volta para outra escolha conveniente D, de modo que sua entropia seja consistente com o valor final (ou inicial). Durante todo esse processo de compressão, o equipamento mantém o equilíbrio térmico na temperatura  $T_2$  enquanto gera muito calor:

$$Q_2 = T_2(S_D - S_C) = -T_2\Delta S$$

Fonte: Chaves e Shellard (2005).

Após isso o vapor flui para a fonte fria (é melhor usar o termo “tanque frio”). Do ponto de vista do vapor, trata-se de calor desperdiçado, que é negativo e seu valor absoluto é inferior ao calor  $Q_1$  previamente absorvido da fonte de calor. Portanto, temos um saldo positivo que corresponde ao que chamamos de trabalho útil, oferecido efetivamente pelo dispositivo. Neste passo do ciclo de Carnot acontece o reestabelecimento da entropia inicial, no que chamamos de compressão isotérmica.

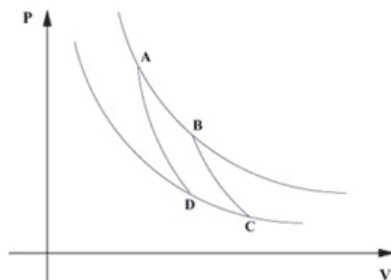
$$W = |Q_1| - |Q_2| = Q_1 + Q_2 = (T_1 - T_2)\Delta S$$

Fonte: Güémez, Fiolhais e Fiolhais (1998).

Para completar o ciclo, a temperatura inicial  $T_1$  precisa ser restaurada, e isso é suficiente para manter o vapor novamente em estado adiabático, para que ele não troque calor com o ambiente e mantenha sua entropia constante. Portanto, a quarta e última etapa do ciclo de Carnot é o aquecimento adiabático ou isoentrópico.

Para simplificar o cálculo, mesmo que considerando apenas a situação específica do gás ideal, esse resultado costuma ser apresentado de forma mais trabalhosa. O diagrama pressão versus volume, neste caso, demonstra que as curvas AB e CD são resultantes das equações do tipo  $pV = \text{const}$ , e as curvas BC e DA compreende as equações do tipo  $pV^g = \text{const}$ , sendo  $g$  um expoente dependente da tipificação de moléculas (mono, diatômica etc.) gasosa, o que por ele próprio constitui uma complicação adicional e nada tem a ver com a segunda lei da termodinâmica.

Para obter o resultado da equação, as quatro constantes ainda devem ser ajustadas primeiro de modo que as quatro extremidades A, B, C e D das quatro curvas coincidam. Em seguida, devem ser integradas as quatro curvas, ou seja, deve-se determinar a área sob cada curva. Essas áreas correspondem ao trabalho mecânico realizado pelo gás em cada etapa. Finalmente, complete o balanço de energia total do ciclo. Se você não cometer nenhum erro nesta série de operações matemáticas, o resultado é obviamente o mesmo que a equação.

**Figura 1** – Representação do ciclo de Carnot no diagrama P×V

Fonte: Oliveira & Dechoum (2003).

## 4 CONCLUSÃO

A segunda lei da termodinâmica envolve a transferência de energia térmica, demonstrando que a troca de calor tende a ser igual a diferentes temperaturas (balanço de calor), o que ocorre naturalmente.

De acordo com o que foi publicado, vemos que, ao usar o diagrama apropriado, há muitas lições para ensinar a segunda lei da termodinâmica. No entanto, embora o Gráfico seja de interesse teórico, seu significado prático é pequeno, porque a entropia não é fácil de medir como a temperatura, pressão, volume e outras grandezas, limitando, portanto, monitoramento do ciclo.

Vale ressaltar que a máquina de Carnot é o único motor térmico reversível que pode rodar um ciclo com apenas dois acumuladores de calor (cada um com temperatura fixa). Dentre todos os motores reversíveis, o de Carnot é uma máquina que oferece maior rendimento. Sendo assim, a saída de qualquer outro ciclo reversível será menor do que a do ciclo de Carnot, o que é essencialmente a proposição de Kelvin para a segunda lei da termodinâmica.

## REFERÊNCIAS

- BEJAN, A. Advanced engineering thermodynamics. **John Wiley & Sons**, p. 53, 1988.
- CARNOT, S. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance**. Gauthier-Villars, Paris (em francês), 1824.
- CHAVES, A.; SHELLARD, R. C. **Física para o Brasil – pensando o futuro**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2005.
- DUGDALE, J. S. Entropy and its Physical Meaning. **Taylor & Francis**, 1996.
- EISBERG, R.M; LERNER, L.S. **Física: fundamentos e aplicações**. Volume 2. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1983.



FERRACIOLI, L. O conceito de energia e a educação ambiental. **Caderno Modelab 11** (Publicação Interna), p. 2-7, 2001.

FERRACIOLI, L. **Commonsense reasoning about processes**: a study of ideas about reversibility. Dissertação (Doctor of Philosophy) – Institute of Education, University of London, 1994.

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.

GÜÉMEZ, J.; FIOLEAIS, C.; FIOLEAIS, M. **Fundamentos de termodinâmica do equilíbrio**. 1998.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MANTOUX, P. **A revolução industrial no século XVIII**. São Paulo: Editora UNESP/HUCITEC, 1980.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. Volume 2. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996. Capítulo 10,

OLIVEIRA, P. M. C. de; DECHOUM, K. Facilitando a compreensão da segunda lei da termodinâmica. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 359-363, dez. 2003. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172003000400004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172003000400004&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 20 abr. 2021.

PARISI, G. Complex Systems: a physicist's viewpoint. **xxx.lanl.gov**, COND-MAT/0205296, 2002.

PRIGOGINE, I.; KONDEPUDI, D. **Thermodynamique**: Des moteurs thermiques aux structures dissipatives. Paris: Ed. Odile Jacob, 1999. p. 58.

SPROULE, A. **James Watt**. São Paulo: Editora Globo, 1993.

---

**Data do recebimento:** 25 de maio de 2021

**Data da avaliação:** 12 de julho de 2021

**Data de aceite:** 12 de julho de 2021

---

---

1 Dados do autor. Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: joao.batista86@souunit.com.br

2 Dados do autor. Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: isac.soares@souunit.com.br

3 Dados do autor. Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: raimundo.rezende@souunit.com.br

4 Dados do autor. Acadêmico do curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: gezrell.santos@souunit.com.br

5 Dados do autor. Mestre; Professor, Universidade Tiradentes – UNIT. E-mail: nelson.antonio@souunit.com.br