

O paradoxo entre a primeira e segunda lei da termodinâmica e a existência da máquina de carnot

The paradox between the first and second law of thermodynamics and the existence of the Carnot machine

Antônio Carlos Belarmino Segundo¹

José Jefferson da Silva Nascimento²

Amélia Edneusa Pereira Arruda³

Anne Beatrice Guedes Sobrinho⁴

Filipe Tawã Gomes⁵

José Jorge da Silva Júnior⁶

Maria Fátima David Dantas⁷

Sabrina dos Santos Costa⁸

Tiago Reis Torres de Aquino⁹

Márcia Janiele Nunes da Cunha Lima¹⁰

RESUMO: A termodinâmica nada mais é do que o estudo de leis e princípios que regem relações entre calor, trabalho e as mais diversas formas de energia. Sua aplicação se estende a diversas áreas como sistemas de refrigeração, usinas de energia, indústria automobilística, assim como o próprio corpo humano, demonstrando assim a importância de seu completo entendimento. A primeira lei da termodinâmica enuncia que toda energia fornecida ao sistema pode ser transformada em trabalho, o que na prática não é verdade, nesse sentido, surge a segunda lei, a qual considera as perdas existentes. Esse trabalho propõe um levantamento teórico sobre a primeira e a segunda lei da termodinâmica além da máquina de Carnot, a fim de elucidar conceitos ainda pouco debatidos.

Palavras-chave: Termodinâmica, Primeira lei da termodinâmica, Segunda lei da termodinâmica, máquina de Carnot.

ABSTRACT: Thermodynamics is nothing more than the study of laws and principles that govern relationships between heat, work and the most diverse forms of energy. Its application extends to several areas such as refrigeration systems, power plants, the automobile industry, as well as the human body itself, thus demonstrating the importance of its complete understanding. The first law of thermodynamics states that all energy supplied to the system can be transformed into work, which in practice is not true. In this sense, the second law arises, which considers existing losses. This work proposes a theoretical survey of the first and second laws of thermodynamics in addition to the Carnot engine, in order to elucidate concepts that are still little debated.

Keywords: Thermodynamics, First law of thermodynamics, Second law of thermodynamics, Carnot engine.

¹ Doutorando em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: carlos.matematica@live.com

² Prof. Doutor (Unidade Acadêmica de Eng de Materiais – UFCG. E-mail: jeffpesquisador@gmail.com

³ Doutoranda em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: amellia.arruda@gmail.com

⁴ Doutoranda em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: annebeatriceguedes@hotmail.com

⁵ Doutorando em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: filipetawa@gmail.com

⁶ Doutorando em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: josejorge_18@hotmail.com

⁷ Doutoranda em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: fatimadaviddantas@hotmail.com

⁸ Doutoranda em Engenharia de Processos – UFCG. E-mail: sabrinamejgph@gmail.com

⁹ Engenheiro Mecânico pela Faculdade Estácio de Sá. E-mail: tiagoreistorresdeaquino@gmail.com

¹⁰ Formada em Enfermagem pela FAZER. E-mail: marciacunhalimaufcg@gmail.com

INTRODUÇÃO

A Termodinâmica é um dos principais campos de estudo da Física, isso é devido principalmente a sua vasta aplicação, e pelo fato das suas leis serem baseadas em observações experimentais (NERY et al, 2019). Todavia, mesmo com sua natureza experimental, um entendimento teórico das suas leis, baseando nas suas definições, e utilizando princípios lógicos, se faz necessário para uma maior compreensão desse campo, tanto por parte dos estudantes, quanto dos pesquisadores (TAKIYA et al., 2020).

Dessa forma, em um mundo que depende cada vez mais da utilização de fontes de energia eficientes, conhecer as leis que garantem a conservação da energia, a sua conversão e principalmente que nem toda essa energia pode ser aproveitada de forma útil, é algo imprescindível. Todavia, sabemos que nem todas as grandezas físicas são apresentadas com a clareza necessária e no que tange a termodinâmica, essa dificuldade de encontrar definições precisas e completas fica ainda mais evidente (CORREIA; GUIMARÃES, 2020; CARVALHO, 2022).

A aplicabilidade da termodinâmica está presente em nosso cotidiano, assim, quando dirigimos um carro, ligamos um ar condicionado ou utilizamos um eletrodoméstico quaisquer, estamos lidando com questões práticas da termodinâmica, que por sua vez, se detém ao estudo das relações envolvendo calor, trabalho mecânico e outros aspectos de energia ou conversão entre diferentes tipos de energia (YOUNG, 2004; MATOS, 2022).

Segundo a primeira lei, as variações de energia que um sistema termodinâmico pode sofrer, dependem em unidade e medida de quantidades intrínsecas do próprio sistema ou de seu exterior, isto é, o trabalho e o calor. Portanto, a energia interna de um sistema varia dependendo tão somente da energia fornecida na forma de calor e do trabalho realizado (TAKIYA et al., 2020). Ao que se refere a origem da segunda lei da termodinâmica é associada ao trabalho do físico Sadi Carnot (1796-1832), o qual estava particularmente interessado na eficiência de máquinas térmicas operando sob condições ideais.

O presente trabalho objetiva realizar uma revisão bibliográfica a respeito da primeira e segunda lei da termodinâmica, apontando as diferenças existentes entre elas,

bem como destacar aspectos importantes da máquina de Carnot, questão importante para o entendimento de modo especial da segunda lei.

Conforme Muller (2019), de um modo geral, a primeira lei da termodinâmica ou princípio da conservação de energia, envolve as grandezas calor, trabalho e variação da energia interna do sistema, enquanto que a segunda lei da termodinâmica é associada a máquinas térmicas e abordada através de dois enunciados, o de Kelvin e o de Clausius.

Primeira Lei da Termodinâmica (Princípio da Conservação de Energia)

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação de energia, afirma que a energia de um sistema isolado é constante. Em outras palavras, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra (RABÊLO et al 2023). Em termos matemáticos, a variação da energia interna (ΔU) de um sistema é igual à quantidade de calor (Q) adicionada ao sistema menos o trabalho (W) realizado pelo sistema sobre o ambiente: $\Delta U = Q - W$.

Essa fórmula representa a relação fundamental entre calor, trabalho e energia interna de um sistema termodinâmico. A energia interna (U) é uma função de estado que depende exclusivamente do estado atual do sistema, e não do caminho pelo qual o sistema chegou a esse estado (MORAN & SHAPIRO, 2008; SOUZA, BINDER e SILVEIRA, 2023; SOUZA e RIBEIRO, 2024).

Em um sistema fechado, não há troca de massa com o ambiente, mas pode haver troca de energia na forma de calor e trabalho. Por exemplo, considere um cilindro com um pistão contendo um gás. Quando o gás é aquecido, ele se expande, realizando trabalho sobre o pistão. A energia interna do gás aumenta devido ao calor fornecido: $Q = \Delta U + W$. Aqui, Q é o calor adicionado ao sistema, ΔU é o aumento da energia interna do gás, e W é o trabalho realizado pelo gás ao mover o pistão (ÇENGEL & BOLES, 2014).

Em um sistema aberto, há troca de massa com o ambiente, além de troca de energia. Um exemplo comum é um motor a jato. O ar entra no motor, é comprimido, aquecido pela combustão do combustível e depois expelido, gerando empuxo. A energia interna do ar muda, e o trabalho é realizado para acelerar o ar para fora do motor: onde Q é a taxa de calor adicionada, W é a taxa de trabalho realizado, m é a taxa de fluxo de massa, e h é a entalpia específica (VAN WYLEN *et al.*, 1994; FERREIRA et al., 2023).

A conservação de energia é um princípio fundamental que permite a análise e o entendimento de qualquer processo termodinâmico. Sua importância se manifesta em várias áreas:

- (i) Eficiência Energética: A primeira lei fornece a base para calcular a eficiência de máquinas térmicas, como motores e turbinas. Saber quanto da energia fornecida como calor é convertido em trabalho útil é crucial para o design de sistemas eficientes (EASTOP & MCCONKEY 1993).
- (ii) Previsão de Comportamento de Sistemas: Com a primeira lei, é possível prever como um sistema irá responder a mudanças de calor e trabalho. Isso é essencial em engenharia, onde previsibilidade e controle são fundamentais para segurança e desempenho (MORAN & SHAPIRO, 2008).
- (iii) Desenvolvimento de Tecnologias Sustentáveis: A compreensão dos princípios de conservação de energia é vital para o desenvolvimento de tecnologias que minimizem o desperdício de energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (ÇENGEL & BOLES, 2014).
- (iv) Diagnóstico e Manutenção: A aplicação da primeira lei permite identificar perdas de energia em sistemas reais, ajudando na manutenção e otimização de processos industriais (VAN WYLEN *et al.*, 1994).

Levenspiel (2002), aponta questões importantes relativas a primeira lei, são elas:

- Calor: Pode ser adicionado ou retirado de um sistema por contato com um corpo mais quente ou mais frio;
- Trabalho: São todas as formas de mudança de energia, como trabalho elétrico e magnético, trabalho químico, trabalho elástico e entre outros;
- Alteração de energia interna de um objeto ou sistema: Pode ser feita de várias formas, como por mudança de temperatura: Aquecimento ou resfriamento ou por mudança de fase: Sólido para líquido ou líquido para vapor, dentre outras formas.

Assim, a energia pode entrar ou deixar o sistema e ser transferida em apenas duas formas: calor ou trabalho. Se a transferência de energia for devido a diferença de temperaturas entre o sistema e a vizinhança, então a transferência de energia se dará como calor, caso contrário será transferida como trabalho (SCHMIDT *et al.* 2014).

A forma mais geral da 1ª Lei da Termodinâmica para sistemas abertos, que considera as taxas de transferência de massa, energia e trabalho é dada pela equação abaixo:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

Onde,

$\frac{dE_{vc}}{dt}$: é a taxa de variação da energia total do volume de controle (energia interna, cinética e potencial).

$\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$: são as taxas de fluxo de massa de entrada e saída, respectivamente.

h_e e h_s : são as entalpias específicas de entrada e saída, respectivamente.

V_e e V_s : são as velocidades de entrada e saída, respectivamente.

z_e e z_s : são as alturas de entrada e saída, respectivamente, em relação a um referencial gravitacional.

$\dot{Q}_{vc}$: é a taxa de calor adicionada ao volume de controle.

$\dot{W}_{vc}$: é a taxa de trabalho realizado pelo volume de controle.

Considerando todas as formas de energia, a 1ª Lei da Termodinâmica para sistemas fechados, é:

$$\frac{d(U)}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right) + \frac{d}{dt} (mgh) = \dot{Q} - \dot{W}$$

Onde,

$\frac{d(U)}{dt}$: Taxa de variação da energia interna do sistema.

$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right)$: Taxa de variação da energia cinética do sistema.

$\frac{d}{dt} (mgh)$: Taxa de variação da energia potencial gravitacional do sistema.

Segunda Lei da Termodinâmica (Entropia e Irreversibilidade)

A segunda lei da termodinâmica afirma que a entropia de um sistema isolado nunca diminui; ela sempre aumenta ou, no melhor dos casos, permanece constante em processos reversíveis. Em termos práticos, isso significa que todos os processos naturais são irreversíveis e tendem a aumentar a desordem ou aleatoriedade do sistema (CORREIA e DUARTE, 2014). A segunda lei pode ser enunciada de várias maneiras, uma das mais comuns sendo a impossibilidade de uma máquina térmica operar em um ciclo e converter todo o calor fornecido em trabalho sem deixar qualquer outro efeito (BRANDIE e

BARLETTE, 2001). Clausius, um dos pioneiros da termodinâmica, expressou essa lei afirmando que o calor não pode fluir espontaneamente de um corpo frio para um corpo quente (MORAN & SHAPIRO, 2008).

Entropia (S) é uma função de estado que quantifica a quantidade de desordem ou aleatoriedade em um sistema. A entropia é uma medida de quão dispersa ou espalhada a energia está dentro de um sistema. Matematicamente, a variação da entropia para um processo reversível pode ser expressa como: $dS = \frac{\delta Q}{T}$, onde δ é o calor trocado de forma reversível e T é a temperatura absoluta na qual a troca de calor ocorre (ÇENGEL & BOLES, 2014).

A implicação mais significativa da entropia é a irreversibilidade dos processos naturais. Em um processo irreversível, a entropia total de um sistema e seu ambiente sempre aumenta. Essa irreversibilidade é uma característica fundamental dos processos espontâneos, como a expansão livre de um gás ou a transferência de calor de um corpo quente para um corpo frio (CATTANI e BASSALO, 2008; VAN WYLEN *et al.*, 1994).

Sendo assim, a segunda lei determina a assimetria fundamental na natureza. 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; SANTOS, 2008).

A seguir, ilustramos alguns exemplos de processos que ilustram a Segunda Lei da Termodinâmica.

(i) Expansão Livre de Gases: Quando um gás se expande livremente em um recipiente isolado, sem realizar trabalho e sem troca de calor com o ambiente, a entropia do gás aumenta. Este processo é altamente irreversível, pois uma vez que o gás se expande, ele não retornará espontaneamente ao seu estado inicial. A energia interna do gás permanece a mesma, mas sua entropia aumenta devido à maior dispersão das moléculas de gás no volume expandido (Moran & Shapiro, 2008).

(ii) Transferência de Calor: Um exemplo clássico da segunda lei é a transferência de calor entre dois corpos a diferentes temperaturas. Quando o calor flui de um corpo quente para um corpo frio, a entropia do corpo quente diminui, enquanto a entropia do corpo frio aumenta. No entanto, o aumento da entropia no corpo frio é maior do que a diminuição da entropia no corpo quente, resultando em um aumento líquido da entropia total do sistema. Esse processo é irreversível, pois o calor não fluirá espontaneamente na direção oposta (ÇENGEL & BOLES, 2014).

(iii) Motores Térmicos e Ciclos de Refrigeração: Nos motores térmicos, como os motores a combustão interna, parte do calor gerado pela queima de combustível é convertido em

trabalho, enquanto o restante é dissipado como calor residual, aumentando a entropia do ambiente. Ciclos de refrigeração, como os encontrados em geladeiras, funciona removendo calor de um espaço frio (diminuição de entropia) e rejeitando-o para um espaço quente (aumento maior de entropia), demonstrando a irreversibilidade desses processos (VAN WYLEN *et al.*, 1994).

A forma mais completa da Segunda Lei da Termodinâmica, especialmente para sistemas abertos e processos, é geralmente expressa considerando a variação de entropia no volume de controle. Para um volume de controle, a equação de balanço de entropia pode ser expressa como:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} + \Sigma(\dot{m}_s s_s) - \Sigma(\dot{m}_e s_e) = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Onde,

$\frac{dS_{cv}}{dt}$: é a taxa de variação da entropia do volume de controle.

$\Sigma(\dot{m}_s s_s)$: é a soma das taxas de fluxo de massa saindo vezes a entropia específica de saída.

$\Sigma(\dot{m}_e s_e)$: é a soma das taxas de fluxo de massa entrando vezes a entropia específica de entrada.

$\frac{\dot{Q}_{cv}}{T}$: é a taxa de transferência de entropia devido ao calor transferido dividido pela temperatura absoluta média.

$\dot{S}_{gen}$: é a taxa de geração de entropia dentro do volume de controle, que é positiva para processos irreversíveis e zero para processos reversíveis.

Para um processo reversível, a geração de entropia ($\dot{S}_{gen}$) é zero, então a equação se simplifica para:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} + \Sigma(\dot{m}_s s_s) - \Sigma(\dot{m}_e s_e) = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}$$

Se considerarmos um estado estacionário onde a entropia no volume de controle não varia com o tempo ($\frac{dS_{cv}}{dt} = 0$), logo a equação pode ser simplificada para:

$$\Sigma(\dot{m}_s s_s) - \Sigma(\dot{m}_e s_e) = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}$$

Finalmente, em um processo isentrópico (adiabático e reversível), onde não há transferência de calor ($\dot{Q}_{cv} = 0$) e a entropia é constante, a equação de balanço de entropia mostra que:

$$\Sigma(\dot{m}_s s_s) = \Sigma(\dot{m}_e s_e)$$

Máquina de Carnot e Ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot é um ciclo termodinâmico ideal que consiste em quatro etapas reversíveis: compressão isotérmica, compressão adiabática, expansão isotérmica e expansão adiabática. Durante a compressão isotérmica, o gás é comprimido a uma temperatura constante, trocando calor com uma fonte quente a uma temperatura (T_1). Em seguida, ocorre uma compressão adiabática, onde não há transferência de calor para ou do ambiente externo, e o gás é comprimido sem troca de calor. Na etapa de expansão isotérmica, o gás expande a uma temperatura constante, absorvendo calor da fonte fria a uma temperatura (T_2). Por fim, ocorre uma expansão adiabática, onde o gás se expande sem trocar calor com o ambiente externo. Este ciclo ideal é representado graficamente em um diagrama P–V como um ciclo fechado, onde cada etapa é representada por uma curva (ÇENGEL & BOLES, 2014).

A eficiência (η) de uma máquina de Carnot é determinada pela relação entre as temperaturas das fontes quente (T_1) e fria (T_2). A eficiência máxima de uma máquina de Carnot é obtida quando opera entre duas fontes de temperatura T_1 e T_2 e é dada por: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

A eficiência da máquina de Carnot é uma expressão do princípio da reversibilidade: é a eficiência máxima teoricamente possível para qualquer máquina térmica operando entre essas duas temperaturas (MORAN & SHAPIRO, 2008).

O teorema de Carnot estabelece que é impossível criar uma máquina térmica mais eficiente que a máquina de Carnot, operando entre as mesmas temperaturas. Este resultado é uma consequência direta da segunda lei da termodinâmica, que afirma que nenhum processo térmico pode ser 100% eficiente na conversão de calor em trabalho. A máquina de Carnot atinge a eficiência máxima teórica, pois opera reversivelmente entre duas temperaturas, maximizando a conversão de calor em trabalho útil. Qualquer outra máquina térmica, operando entre as mesmas temperaturas, seria menos eficiente devido a irreversibilidades internas (VAN WYLEN *et al.*, 1994).

Paradoxo entre a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica

A máquina de Carnot é fundamental para a compreensão do paradoxo aparente entre a primeira e a segunda lei da termodinâmica. Enquanto a primeira lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia, a segunda lei impõe limitações à eficiência dos processos naturais, afirmando que a entropia total de um sistema isolado sempre aumenta ou permanece constante em processos reversíveis. A máquina de Carnot, operando de maneira reversível entre duas temperaturas T_1 e T_2 , parece reconciliar essas leis ao alcançar a eficiência máxima teoricamente possível. Por meio de um ciclo termodinâmico ideal, a máquina de Carnot demonstrou que é possível converter calor em trabalho de maneira altamente eficiente, respeitando as restrições impostas pela segunda lei (MORAN & SHAPIRO, 2008).

Embora a máquina de Carnot demonstre a possibilidade teórica de alcançar a máxima eficiência na conversão de calor em trabalho, essa eficiência máxima é limitada pela segunda lei da termodinâmica. Embora a primeira lei garanta a conservação de energia, a segunda lei estabelece que nem toda a energia pode ser convertida em trabalho útil, pois parte dela é dissipada como calor residual. Assim, a eficiência máxima teórica da máquina de Carnot é determinada pela relação entre as temperaturas das fontes quente e fria, e qualquer desvio dessa condição resultará em uma diminuição da eficiência. Portanto, apesar da conservação de energia, a segunda lei impõe limitações fundamentais à eficiência dos processos termodinâmicos (ÇENGEL & BOLES, 2014).

Ao comparar sistemas reais com a máquina de Carnot, é evidente que os processos naturais estão sujeitos a limitações impostas pela irreversibilidade. Por exemplo, motores de combustão interna e turbinas a vapor, embora baseados nos mesmos princípios termodinâmicos da máquina de Carnot, são significativamente menos eficientes devido a irreversibilidades internas, como fricção, dissipação de calor e vazamentos. Como resultado, a eficiência real desses sistemas é sempre inferior à eficiência máxima teórica da máquina de Carnot operando entre as mesmas temperaturas. Da mesma forma, ciclos de refrigeração e bombas de calor também sofrem perdas de eficiência devido a irreversibilidades, tornando-os menos eficientes do que a máquina de Carnot. Portanto, enquanto a máquina de Carnot fornece um padrão teórico para eficiência máxima, os sistemas reais estão sujeitos a limitações impostas pela segunda lei da termodinâmica (VAN WYLEN *et al.*, 1994).

A máquina de Carnot e o paradoxo entre a primeira e a segunda lei da termodinâmica destacam a complexidade e as limitações inerentes aos processos

termodinâmicos, proporcionando uma base crucial para o entendimento das leis que governam o comportamento da energia no universo.

Impacto Histórico e Conceitual da Máquina de Carnot na Termodinâmica

Sadi Carnot é amplamente reconhecido por sua contribuição pioneira para a termodinâmica, especialmente por sua análise da eficiência das máquinas térmicas. Em seu trabalho seminal, "Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo" (1824), Carnot apresentou o conceito fundamental da máquina térmica ideal, agora conhecida como máquina de Carnot. Ele demonstrou que a eficiência máxima de qualquer máquina térmica está relacionada às temperaturas das fontes quente e fria, estabelecendo assim as bases para a segunda lei da termodinâmica.

As ideias de Carnot foram desenvolvidas e formalizadas por Rudolf Clausius e Lord Kelvin no século XIX. Clausius formulou o conceito de entropia e enunciou a segunda lei da termodinâmica, definindo-a matematicamente. Ele demonstrou que a eficiência máxima de uma máquina térmica está relacionada ao calor trocado entre as fontes quente e fria, estabelecendo a base para o desenvolvimento posterior da termodinâmica. Lord Kelvin contribuiu para a compreensão do conceito de temperatura absoluta e desenvolveu a escala de temperatura termodinâmica, ampliando assim o entendimento da termodinâmica clássica.

Ao longo do tempo, o entendimento da eficiência das máquinas térmicas evoluiu significativamente, impulsionado pelos trabalhos de Carnot, Clausius, Kelvin e outros cientistas e engenheiros. Inicialmente, a eficiência das máquinas térmicas era limitada pelo desconhecimento das leis fundamentais que governam os processos termodinâmicos. No entanto, com o desenvolvimento da termodinâmica, especialmente a segunda lei, tornou-se claro que a eficiência máxima de uma máquina térmica está intrinsecamente ligada às temperaturas das fontes quente e fria e à irreversibilidade dos processos.

Apesar de ser um conceito desenvolvido no século XIX, o ciclo de Carnot continua a ter uma influência significativa em tecnologias modernas. Motores térmicos, como motores a combustão interna e turbinas a vapor, são projetados e otimizados com base nos princípios do ciclo de Carnot, buscando alcançar a máxima eficiência possível. Da mesma forma, refrigeradores e bombas de calor utilizam princípios semelhantes ao ciclo

de Carnot para transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente, proporcionando resfriamento em ambientes controlados.

Além disso, o ciclo de Carnot é fundamental na compreensão e desenvolvimento de tecnologias de energia sustentável, como energia geotérmica, energia solar concentrada e células de combustível. Essas tecnologias exploram os princípios termodinâmicos para converter calor em trabalho útil, minimizando o desperdício de energia e reduzindo o impacto ambiental.

Assim, o impacto histórico e conceitual da máquina de Carnot na termodinâmica é evidente não apenas em sua contribuição inicial para o entendimento dos processos termodinâmicos, mas também em sua contínua relevância e aplicação em tecnologias modernas.

RESULTADOS

A segunda lei é importante porque fornece um meio de se medir o desvio de um processo real para o caso ideal. Essa medida nos permite comparar os processos reais, e é útil ao prestar auxílio para selecionar o processo mais eficiente (MACIEL e MARLON, 2022). Desse modo, com intuito de exemplificar esses conceitos, foram estimados alguns valores de temperatura, calor recebido e trabalho e calculados os rendimentos real e de Carnot (SIMÕES, 2021) (Tabela 1).

Tabela 1: Avaliação da existência de máquinas a partir da comparação dos resultados de rendimento real e de Carnot. Onde: T1 e T2 - temperatura; W- trabalho; Q1- calor recebido; Nc - rendimento de Carnot; Nreal- rendimento da máquina; PE - Possível existência.

Máquina	T1	T2	W	Q1	Nc	Nreal	P.E
1	743	343	700	2000	54%	35%	Sim
2	873	473	700	2000	46%	35%	Sim
3	543	373	700	2000	31 %	35%	Não

Fonte: Produção do pesquisador.

O cálculo de n real da máquina é dado pela seguinte equação:

$$n = \frac{W}{Q1} \quad (1)$$

O cálculo de n carnot, por sua vez, pode ser obtido da seguinte forma:

$$nc = 1 - \frac{T2}{T1} \quad (2)$$

Se $n < nc$, podemos afirmar a possível existência da máquina.

Assim, através dos cálculos realizados com os respectivos valores admitidos, observamos que uma das máquinas não é possível existir, visto que o seu rendimento foi maior que aquele apresentado pelo rendimento de Carnot. Sendo $n > nc$, sabendo-se que uma máquina térmica nunca poderá ter seu rendimento igual a 1, isto é, conforme já discutido, ela nunca será capaz de transformar todo o calor que é fornecido em trabalho.

Nesse contexto, por exemplo, a partir dessa análise podemos dizer se há viabilidade ou não para uma empresa a aquisição de determinada máquina e se faz sentido o seu rendimento informado a partir da comparação com o rendimento de Carnot, que corresponde ao rendimento máximo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho procuramos enfatizar os conceitos relativos à primeira e segunda lei da termodinâmica, destacando as nuances existentes entre elas. Dessa forma vimos que a segunda lei da termodinâmica surgiu a partir da necessidade de englobar questões ainda não propostas pela primeira lei, como a energia perdida, afinal não existe perfeição em qualquer processo.

Por último, no que diz respeito à Carnot, este descobriu que o melhor aproveitamento da máquina dependia apenas das fontes quente e fria, dando origem à fórmula que permite o cálculo do rendimento máximo, com isso, podemos avaliar a existência e viabilidade de outras máquinas.

REFERÊNCIAS

BRANDIE, André Pedrozini; BARLETTE, Vania Elisabeth. Degradação ambiental: uma abordagem por entropia. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 161-170, 2001.

CATTANI, M.; BASSALO, Jose Maria Filardo. Entropia, reversibilidade, irreversibilidade, equação de transporte e teorema H de Boltzmann e o teorema do retorno de Poincaré. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 2301.1-2301.9, 2008.

CARVALHO, Paulo. **O Uso da Energia: 4 Milhões aC aos Tempos Atuais**. Lisbon, 2022.

CORREIA, Jornandes; DUARTE JOSÉ, Wagner. O conceito de entropia e as leis da termodinâmica em livros didáticos de física. **Colóquio do Museu Pedagógico-ISSN 2175-5493**, v. 10, n. 1, p. 199-212, 2014

CORREIA, J. J; GUIMARÃES, G. F. Definição da energia livre de Helmholtz em fontes didáticas. *Revista Binacional Brasil-Argentina: Diálogo entre as ciências*. v. 8. 2020

ÇENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.

EASTOP, T. D., & MCCONKEY, A. (1993). *Applied Thermodynamics for Engineering Technologists*. Pearson Education.

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

FERREIRA, M., SILVA FILHO, O. L., BATISTA, M. C., ABRÃO FILHO, A., STRAPASSON, A., & SANTANA, A. E. D. Ficção científica na transposição didática do conceito de Entropia: a última pergunta de Isaac Asimov. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 45, e20230254. (2023).

LEVENSPIEL, O. Termodinâmica amistosa para engenheiros. Editora Blucher. 1º edição. 2002.

NERY, L. M., RIBEIRO, M. V. C., SOUZA, M., OLIVEIRA, R. A., CUNHA, D. C., & SIMONETTI, S. V. C. Estudo da capacidade de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibú-Mirim. *Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia*, 2, 52-63. (2019).
MATOS, Leandro Lelis. Restaurar a diferença na sensibilidade: Deleuze crítico de Kant. **Griot: Revista de Filosofia**, v. 22, n. 2, p. 168-186, 2022.

MACIEL, Eugênio Bastos; MARLON, Yanneson. **Termodinâmica:: fundamentos e aplicações**. Editora Intersaberes, 2022

MÜLLER, A. T. Estudo das primeira e segunda leis da termodinâmica com o emprego de experimentos e um motor Stirling. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – PPGEnFis - UFES, Vitória, 2019.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2008). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons.

SCHMIDT, F.W; HENDERSON, R.E; WOLGEMUTH, C.h. Introdução as ciências térmicas: Termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Editora Blucher. 2014.

TAKIYA, C; GUIMARÃES, G.F; SANTANA, I.L; LEMOS, L.S. Abordagens termodinâmicas: Uma análise das leis e dos principais conceitos em livros didáticos. *Revista Binacional Brasil Argentina*. Bahia, Brasil. Vol. 9. 2020.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., & BORGNAKKE, C. (1994). *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. John Wiley & Sons. Young, Hugh D. Física II: Termodinâmica e ondas/ Hugh D. Young, Roger A. Freedman. São Paulo. Addison Wesley. 2004.

RABÊLO, André Andrade; CAMPOS, Laélia; RIBEIRO, Tiago Nery. A Degradação ambiental como tema para o ensino da 2ª lei da termodinâmica usando a metodologia ensino sob medida. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 18, n. 4, p. 44-59, 2023.

SANTOS, Zanoni Tadeu Saraiva. Conteúdo de entropia na física do ensino médio: análise do material didático e abordagem histórica. **HOLOS**, v. 3, p. 75-84, 2008.

SOUZA, Fernando, de J.; RIBEIRO, Tiago Nery. As Simulações Educacionais no Ensino de Física: Aplicando Uma UEPS Sobre a Primeira Lei da Termodinâmica Utilizando a Abordagem POE. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 7, n. 1, 2024.

SOUZA, Ana Paula Grimes; BINDER, Iara Maitê Campestri; SILVEIRA, Renata Feuser. O conceito de entropia e sua relação com o processo econômico: implicações ao Ensino de Física. **Revista Educar Mais**, v. 7, p. 95-107, 2023.

SIMÕES, Luís Filipe Chuva. **Análise termodinâmica e teste de desempenho a uma central termoelétrica**. Dissertação da Politécnico de Coimbra | Instituto Superior de Engenharia de Coimbra 2021. 96p.