

ARTIGO

GERAÇÃO DE ENERGIA POR CICLOS TERMODINÂMICOS

Ana Paula Cunha Ferreira

Paulo Sérgio Pádua de Lacerda

RESUMO

O presente trabalho analisa e compara diferentes formas de geração de energia elétrica baseadas em ciclos termodinâmicos. A crescente demanda global por energia e a necessidade de fontes mais eficientes e sustentáveis impulsionam o desenvolvimento de tecnologias que otimizem a conversão de energia térmica em elétrica. O estudo aborda os fundamentos da termodinâmica e os principais ciclos industriais: Rankine (usinas a vapor), Brayton (turbinas a gás) e Diesel (motores de combustão interna). A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica e análise comparativa de eficiência, custos e impactos ambientais de cada sistema. Também são discutidas inovações tecnológicas e tendências para aprimoramento dos processos. Os resultados mostram que cada ciclo apresenta vantagens e limitações, e que a escolha do sistema ideal depende de fatores como recursos disponíveis, escala produtiva e exigências ambientais. Conclui-se que o aprimoramento contínuo da eficiência e da sustentabilidade dos ciclos termodinâmicos é fundamental para a transição energética e a mitigação dos impactos climáticos.

Palavras-chave: Ciclos termodinâmicos; Geração de energia; Eficiência energética; Sustentabilidade; Engenharia

ABSTRACT

This study analyzes and compares different methods of generating electrical energy based on thermodynamic cycles. The growing global demand for energy, along with the need for more efficient and sustainable sources, drives the development of technologies that optimize the conversion of thermal energy into electricity. The research addresses the fundamentals of thermodynamics and the main industrial cycles: Rankine (steam power plants), Brayton (gas turbines), and Diesel (internal combustion engines). The methodology is based on a bibliographic review and a comparative analysis of the efficiency, costs, and environmental impacts of each system. Technological innovations and trends for process improvement are also discussed. The results show that each cycle has specific advantages and limitations, and that the choice of the most suitable system depends on factors such as resource availability, production scale, and environmental requirements. It is concluded that the continuous improvement of the efficiency and sustainability of thermodynamic cycles is essential for the energy transition and the mitigation of climate impacts.

Keywords: Thermodynamic cycles; Power generation; Energy efficiency; Sustainability; Engineering.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é um dos elementos mais estratégicos para o desenvolvimento econômico, social e tecnológico da humanidade. Desde a Revolução Industrial, a energia tem sido a base para a modernização das sociedades, possibilitando avanços na indústria, na mobilidade urbana, nas telecomunicações e em praticamente todas as áreas do cotidiano. No entanto, o modelo tradicional de produção energética, historicamente fundamentado no uso intensivo de combustíveis fósseis, trouxe consigo uma série de problemas ambientais.

Nesse cenário, os ciclos termodinâmicos têm papel central, uma vez que representam os processos fundamentais pelos quais a energia térmica é convertida em energia mecânica e, posteriormente, em eletricidade. A compreensão desses ciclos é essencial para o aperfeiçoamento dos sistemas de geração, permitindo maior eficiência, redução de custos operacionais e mitigação de impactos ambientais. Entre os principais ciclos empregados industrialmente destacam-se o Ciclo de Rankine, aplicado em usinas termelétricas a vapor; o Ciclo de Brayton, utilizado em turbinas a gás; e o Ciclo Diesel, presente em motores de combustão interna.

Os desafios contemporâneos no setor energético não se limitam à simples expansão da capacidade instalada. O debate atual gira em torno de como produzir energia de forma mais eficiente, econômica e sustentável. Diante desse panorama, a questão central que este trabalho busca responder é: como os diferentes ciclos termodinâmicos empregados na geração de energia se comparam em termos de eficiência, custo e impacto ambiental, e de que maneira inovações tecnológicas podem contribuir para sua otimização?

Essa delimitação se justifica porque, apesar da ampla aplicação dos ciclos de Rankine, Brayton e Diesel, ainda existem lacunas no que diz respeito à avaliação integrada desses sistemas, sobretudo quando se considera a necessidade de atender a contextos energéticos diversos, como regiões com alta disponibilidade de biomassa, locais com acesso a gás natural ou países que ainda dependem fortemente do carvão mineral.

A relevância deste estudo reside em seus aspectos científico e prático. Cientificamente, o aprofundamento nos ciclos termodinâmicos forma engenheiros aptos a desenvolver soluções inovadoras diante dos desafios energéticos atuais. Na prática, a pesquisa orienta decisões estratégicas em projetos públicos e privados, apoiando políticas de transição energética e adoção de tecnologias limpas. Com caráter interdisciplinar, a análise integra conceitos de termodinâmica, engenharia, economia e sustentabilidade, oferecendo uma visão sistêmica da geração de energia e de seus impactos sociais e ambientais.

O objetivo central deste trabalho é analisar e comparar os principais sistemas de ciclos termodinâmicos utilizados para a geração de energia elétrica, considerando critérios de eficiência energética, viabilidade econômica e impactos ambientais. Com relação aos objetivos específicos:

- ✓ Descrever de forma detalhada os princípios de funcionamento dos ciclos de Rankine, Brayton e Diesel, destacando seus principais componentes e aplicações práticas.
- ✓ Realizar uma análise comparativa entre os ciclos, com foco na eficiência energética e nos custos de implantação e operação.
- ✓ Avaliar os impactos ambientais associados a cada sistema, considerando aspectos como emissão de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e poluição térmica.
- ✓ Identificar inovações tecnológicas e tendências futuras voltadas à otimização dos ciclos termodinâmicos, com ênfase em soluções que integrem sustentabilidade e competitividade econômica.

- ✓ Discutir a importância da incorporação desses sistemas no contexto da matriz energética nacional e internacional, destacando seu papel na transição para fontes menos poluentes.
- ✓

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos da Termodinâmica

A termodinâmica, ciência que estuda as transformações de energia e sua capacidade de realizar trabalho, consolidou-se desde o século XIX como base da engenharia, orientando o desenvolvimento de máquinas térmicas. Conforme Çengel e Boles (2019), sua aplicação permite avaliar o desempenho e a eficiência de sistemas energéticos. A Primeira Lei, ou conservação da energia, explica a conversão entre formas energéticas, enquanto a Segunda Lei, ao introduzir a entropia e a irreversibilidade, define os limites de eficiência dos processos reais.

2.2 O Ciclo de Rankine

2.2.1 Princípios de Funcionamento

O Ciclo de Rankine é fundamental na engenharia térmica e serve como padrão para conversão de calor em trabalho nas usinas termelétricas. Baseado nos princípios da termodinâmica, foi desenvolvido para superar limitações do Ciclo de Carnot, tornando-se tecnologicamente viável. Composto por compressão, aquecimento, expansão e condensação, transforma água em vapor e converte energia térmica em elétrica. Sua eficiência depende da pressão, temperatura e perdas por atrito e irreversibilidade. Embora o Carnot seja teoricamente mais eficiente, o Rankine se destaca pela simplicidade, robustez e ampla aplicação na geração de energia mundial.

2.2.2 Componentes e Sub-sistemas

O desempenho de uma usina a vapor pelo Ciclo de Rankine depende da eficiência de seus componentes. A bomba pressuriza o fluido com baixo consumo de energia; a caldeira realiza a combustão ou recebe calor de reatores nucleares; a turbina converte vapor em energia mecânica; e o condensador resfria o vapor em líquido. Sistemas regenerativos pré-aquecem a água de alimentação e reaquecedores aumentam a temperatura do vapor, reduzindo umidade e melhorando eficiência, que pode crescer até 5% com regeneração (Alvares et al., 2020).

Variações incluem o Ciclo Reaquecido, que eleva a temperatura do vapor após expansão parcial; o Ciclo Regenerativo, que recupera calor do vapor parcialmente expandido; o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), usando fluidos de baixo ponto de ebulição para calor de baixa temperatura (Quoilin et al., 2013); e os ciclos supercríticos/ultra-supercríticos, que operam acima do ponto crítico da água, com eficiência >45%. O Rankine é aplicado em matrizes a carvão, biomassa, cogeração e nuclear, destacando-se por versatilidade, robustez tecnológica e adaptação a diferentes combustíveis e condições operacionais.

2.3 O Ciclo de Brayton

2.3.1 Princípios de Funcionamento

O Ciclo de Brayton, ou ciclo de turbina a gás, proposto no século XIX, consolidou-se como processo chave de conversão de energia térmica em mecânica, sendo amplamente usado na propulsão aeronáutica e geração estacionária de energia elétrica. No ciclo ideal, quatro processos ocorrem continuamente: compressão adiabática do ar no compressor, adição de calor a pressão constante na câmara de combustão, expansão adiabática dos gases na turbina, transferindo energia ao eixo, e rejeição de calor ao final do processo, seja para a atmosfera (ciclos abertos) ou trocadores de calor (ciclos fechados).

A eficiência térmica depende da razão de compressão e da temperatura máxima na turbina. Segundo Incropera e DeWitt (2017), turbinas modernas suportam temperaturas acima de 1500 °C, graças a materiais cerâmicos avançados e sistemas de resfriamento interno, aumentando eficiência, reduzindo emissões e prolongando a vida útil. Nos ciclos reais, há perdas irreversíveis por atrito e calor, mas a simplicidade do ciclo e sua alta densidade de potência o tornam competitivo para diversas aplicações.

2.3.2 Componentes e Sub-sistemas

O desempenho do Ciclo de Brayton depende da integração de seus principais componentes. O compressor pressuriza o ar de entrada, sendo axial em turbinas grandes e centrífugo em menores. A câmara de combustão queima o combustível (gás natural, querosene, óleo ou hidrogênio) com o ar comprimido, utilizando projetos de baixa emissão de NOx. A turbina converte a energia dos gases em trabalho mecânico, operando em estágios de alta e baixa pressão, com pás em superligas metálicas resfriadas internamente para suportar altas temperaturas. O sistema de exaustão conduz os gases, que em usinas estacionárias podem alimentar uma caldeira de recuperação de calor, formando ciclos combinados.

Sub-sistemas auxiliares aumentam a eficiência: regeneradores recuperam calor para pré-aquecer o ar comprimido; intercoolers resfriam o ar entre estágios de compressão; reaquecedores aquecem o fluido entre etapas de expansão, extraíndo mais trabalho da turbina. Saravanamuttoo et al. (2017) indicam que a combinação desses sistemas pode elevar a eficiência em até 15%, tornando o Ciclo de Brayton mais competitivo em geração de energia.

2.3.3 Variações e Aplicações

O Ciclo de Brayton possui variações que vão da aviação à geração estacionária de eletricidade. No Ciclo Aberto, o ar é comprimido, aquecido e liberado para a atmosfera, comum em turbinas aeronáuticas e industriais. O Ciclo Fechado, usado em aplicações especiais como energia solar ou nuclear, circula fluidos como hélio ou CO₂ supercrítico. O Ciclo Regenerativo recupera calor dos gases de exaustão, aumentando a eficiência.

Ciclos Interresfriados e Reaquecidos combinam múltiplos estágios de compressão e expansão, melhorando o desempenho. O Ciclo Combinado associa Brayton e Rankine, aproveitando calor residual da turbina a gás para gerar vapor adicional, atingindo eficiências superiores a 60% (IEA, 2021).

Na geração elétrica, o Ciclo de Brayton é valorizado pela partida rápida, flexibilidade e menor tempo de construção. Em países que utilizam gás natural, como EUA e alguns do Oriente Médio, turbinas a gás compõem parcela importante da matriz elétrica. Na aviação, forma a base de turbofans, turbojatos e turboprops, com avanços no uso de biocombustíveis sustentáveis (SAF) e hidrogênio, reduzindo emissões. Sua versatilidade, adaptabilidade a novos combustíveis e materiais avançados explicam a presença estratégica do Ciclo de Brayton e seu papel contínuo no futuro da energia e mobilidade global.

2.4 O Ciclo Diesel

2.4.1 Princípios de Funcionamento

O Ciclo Diesel, desenvolvido por Rudolf Diesel no final do século XIX, é essencial para a engenharia automotiva e geração estacionária de energia. Sua característica principal é a ignição por compressão, onde o ar é comprimido a altas pressões e temperaturas, fazendo o combustível inflamar-se espontaneamente, sem velas.

O ciclo teórico possui quatro etapas: compressão adiabática do ar, elevando a temperatura a 500–700 °C; adição de calor a pressão constante, com injeção e combustão do combustível; expansão, que realiza trabalho mecânico; e rejeição de calor, expulsando os gases e reiniciando o ciclo.

Segundo Heywood (2018), a alta taxa de compressão (14:1 a 25:1) proporciona eficiência térmica superior à do Ciclo Otto, tornando motores Diesel ideais para aplicações que exigem autonomia e economia, como transporte rodoviário, marítimo e ferroviário. Apesar de perdas em ciclos reais por atrito, atrasos de combustão e dissipação térmica, sua eficiência global permanece entre as mais altas dos motores de combustão interna.

2.4.2 Componentes e Subsistemas

Os motores Diesel modernos incorporam tecnologias que aumentam desempenho, reduzem emissões e melhoram a confiabilidade. O sistema de injeção de combustível evoluiu para o common-rail, com pressões acima de 2000 bar, garantindo melhor atomização e combustão completa. Turbocompressores, inclusive de geometria variável, usam energia dos gases de exaustão para aumentar a densidade do ar admitido, permitindo maior potência sem aumentar proporcionalmente o consumo. Sistemas de pós-tratamento, como catalisadores de oxidação, filtros de partículas (DPF) e redução catalítica seletiva (SCR), reduzem NOx e material particulado. Sistemas de arrefecimento e lubrificação evitam superaquecimento e desgaste prematuro, garantindo durabilidade.

Esses avanços tornaram os motores Diesel mais limpos e eficientes, atendendo a normas internacionais, como Euro VI e PROCONVE P8.

2.4.3 Variações e Aplicações

O Ciclo Diesel apresenta variações que aumentam sua versatilidade. Motores turbodiesel combinam ciclo básico, turbocompressão e intercoolers, elevando potência e torque e reduzindo consumo. O Ciclo Duplo mistura características dos Ciclos Otto e Diesel, melhorando o rendimento em certas condições. Em aplicações estacionárias, motores Diesel alimentam grupos geradores em locais remotos ou como emergência. Em aplicações móveis, dominam transporte pesado, devido à durabilidade e economia.

O ciclo também se integra a biocombustíveis, como biodiesel e HVO (óleo vegetal hidrotratado), reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Zhang et al., 2020). Pesquisas em motores dual-fuel exploram hidrogênio e gás natural, ampliando a sustentabilidade futura. Assim, o Ciclo Diesel permanece relevante globalmente por sua eficiência, versatilidade e capacidade de adaptação a novos combustíveis e normas ambientais.

2.5 Outros Ciclos e Tecnologias

Além dos ciclos de Rankine, Brayton e Diesel, existem outros ciclos termodinâmicos e tecnologias emergentes que merecem destaque devido ao seu potencial para a geração de energia e sua relevância no contexto da transição energética.

2.5.1 Ciclo Stirling

O Ciclo Stirling é um motor de combustão externa que utiliza um gás de trabalho em circuito fechado, com calor fornecido externamente. Pode operar com diversas fontes, como energia solar concentrada, biomassa, resíduos industriais e calor residual. Sua principal característica é a alta eficiência teórica, próxima do Ciclo de Carnot.

O ciclo inclui quatro processos: expansão isotérmica, onde o gás absorve calor e realiza trabalho; rejeição de calor a volume constante, transferindo calor para o regenerador; compressão isotérmica, com rejeição de calor para a fonte fria; e adição de calor a volume constante, recuperando calor do regenerador.

Apesar da eficiência, enfrenta desafios práticos, como selagem do gás, transferência de calor em altas temperaturas e alto custo de fabricação. Sua versatilidade, baixo ruído e vibração o tornam promissor para geração de energia em pequena escala, sistemas solares concentrados e cogeração de calor e eletricidade.

2.5.2 Ciclo de Kalina

O Ciclo de Kalina, desenvolvido por Alexander Kalina, é uma variação do Ciclo de Rankine que utiliza uma mistura de água e amônia como fluido de trabalho. A mistura permite ajustar a temperatura de ebulição e condensação, aumentando a eficiência na absorção de calor de fontes residuais.

Suas principais características são: aproveitamento de calor residual, ideal para exaustão de motores, usinas geotérmicas ou processos industriais; maior eficiência termodinâmica, minimizando perdas por irreversibilidade; e complexidade do sistema, que exige trocadores de calor específicos, separador da mistura e retificador para purificação do vapor.

O Ciclo de Kalina é promissor para melhorar a eficiência de usinas termelétricas, especialmente em ciclo combinado ou com biomassa, recuperando calor que seria desperdiçado. 2.5.3 Ciclo Supercrítico de Dióxido de Carbono (s-CO₂) O Ciclo Supercrítico de CO₂ (s-CO₂) utiliza CO₂ em estado supercrítico como fluido de trabalho, combinando alta densidade e baixa viscosidade. Isso reduz a compressão necessária, diminuindo o trabalho do compressor e aumentando a eficiência líquida do ciclo.

As vantagens do s-CO₂ incluem alta eficiência, superior a 50%, componentes compactos, reduzindo custo e espaço, e versatilidade, podendo ser acoplado a reatores nucleares, energia solar concentrada e recuperação de calor industrial. Apesar do potencial, desafios envolvem alta pressão, escolha de materiais e controle de fugas. A tecnologia tem grande perspectiva em sistemas de próxima geração que buscam eficiência e compactidade.

A análise dos ciclos Rankine, Brayton e Diesel, complementada por Stirling, Kalina e s-CO₂, reforça a relevância do estudo, mostrando que otimização não se limita aos ciclos tradicionais. Isso se conecta aos objetivos do trabalho: compreender princípios e variações de cada ciclo, comparar eficiência, custos e impactos ambientais, e identificar inovações, como cogeração e ciclos combinados, essenciais para uma matriz energética mais sustentável e competitiva. A pesquisa evidencia que a engenharia energética do século XXI busca equilíbrio entre segurança, economia e responsabilidade ambiental.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa é o conjunto de procedimentos sistemáticos e racionais que guiam a condução de um estudo, permitindo alcançar os objetivos propostos. Para este trabalho, a abordagem metodológica foi cuidadosamente planejada para garantir a precisão e a confiabilidade das informações, bem como para oferecer uma análise aprofundada e comparativa dos ciclos termodinâmicos.

3.1 Tipo de Pesquisa

O estudo é uma pesquisa bibliográfica, baseada na revisão de livros, artigos, teses e outros documentos, adequada para analisar e comparar formas de geração de energia elétrica por ciclos termodinâmicos. A revisão permite aprofundar os princípios da termodinâmica e detalhar os principais ciclos industriais.

O trabalho também é exploratório e descritivo: exploratória ao identificar inovações e tendências para otimização dos processos; descritivo ao detalhar o funcionamento dos ciclos Rankine, Brayton e Diesel, seus componentes, custos, eficiências e impactos ambientais. Essa abordagem permite sintetizar o conhecimento existente, propor novas perspectivas e identificar lacunas na literatura, reforçando a relevância científica e prática do estudo.

3.2 Procedimentos de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de revisão bibliográfica aprofundada, seguindo três etapas:

- ✓ Levantamento de fontes: foram selecionados livros de referência em termodinâmica e engenharia de energia, como Çengel e Boles e Incropera e DeWitt, reconhecidos academicamente.
- ✓ Pesquisa em bases de dados: foram consultados artigos recentes em Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e ScienceDirect, abordando eficiência energética, inovações em ciclos termodinâmicos, custos e impactos ambientais. Para o Ciclo de Rankine, foram usados Alvares et al. e Quoilin et al.; para Brayton, Saravanamuttoo et al. e IEA (2021); para Diesel, Heywood e Zhang et al.
- ✓ Seleção e análise do material: os documentos foram filtrados pela relevância aos objetivos, priorizando dados comparativos de eficiência, análises de custo-benefício e impactos ambientais, complementados por relatórios de organizações internacionais, como a IEA, para informações atualizadas sobre o setor energético.

3.3 Análise de Dados

Após a coleta, os dados foram analisados qualitativa e quantitativamente. A análise qualitativa sintetizou informações sobre princípios teóricos e contextos de aplicação de cada ciclo. A quantitativa comparou dados de eficiência energética e custos de implantação e operação, identificando vantagens e desvantagens de cada sistema.

A análise comparativa considerou três eixos:

Eficiência Energética: avaliação do desempenho térmico, influenciada por fatores como razão de compressão no Brayton e pressão na turbina do Rankine, incluindo inovações como ciclos supercríticos, ultra-supercríticos e combinados (>60% de eficiência).

Custos: comparação de CAPEX e OPEX, considerando consumo de combustível, manutenção e vida útil, destacando a simplicidade do Rankine e Brayton e a complexidade do Kalina.

Impactos Ambientais: análise das emissões de gases de efeito estufa, poluição e consumo de recursos, incluindo tecnologias Diesel modernas com pós-tratamento e uso de biocombustíveis e hidrogênio.

A metodologia também buscou identificar inovações e tendências para otimização. Concluiu-se que cada ciclo tem vantagens e limitações específicas, e a escolha depende de recursos disponíveis, escala de produção e regulamentações ambientais.

3.4 População e Amostra (se aplicável)

Neste estudo bibliográfico, os conceitos de população e amostra diferem dos estudos empíricos. A população é o conjunto completo de conhecimento científico e técnico disponível sobre ciclos termodinâmicos aplicados à geração de energia. A amostra consiste nos livros, artigos, relatórios e teses selecionados para a revisão, escolhidos intencionalmente por relevância, atualidade (como relatórios da IEA) e capacidade de fornecer dados comparativos e aprofundados sobre o tema.

3.5 Instrumentos

Os principais instrumentos de pesquisa utilizados foram as próprias fontes bibliográficas e as ferramentas de busca e organização do conhecimento. Estes instrumentos incluem:

- ✓ Bases de dados acadêmicas: Scopus, Web of Science, Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect, entre outras, foram utilizadas para a busca sistemática de artigos científicos relevantes.
- ✓ Livros e manuais técnicos: Materiais de referência como os de Çengel e Boles (2019) e Incropera e DeWitt (2017) foram utilizados para aprofundar os fundamentos da termodinâmica.
- ✓ Software de gerenciamento de referências: Ferramentas como Mendeley ou Zotero podem ser utilizadas para a organização das citações e a criação da bibliografia, garantindo a rastreabilidade e a precisão das referências citadas no texto.

4. DESENVOLVIMENTO / RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparativo de Geração de 100 kWh em Diferentes Ciclos Termodinâmicos, que apresenta uma análise comparativa da geração de 100 kWh de energia utilizando quatro ciclos termodinâmicos: Rankine, Brayton, Diesel e Stirling. São destacadas as etapas, consumo de fluido de trabalho ou combustível e eficiência, com base em modelos ideais simplificados.

Tabela 1 – Comparativo resumido de geração de 100 kWh (valores aproximados)

Ciclo	Trabalho/ Líquida (kJ/kg)	Energia	Fluxo de Massa / Combustível	Energia Total Necessária (kJ)	Observações
Rankine	1238,16		290,75 kg de água	360.000	Menor fluxo de massa, alta eficiência com água

Brayton	281,9	1.277,8 kg de ar	360.000	Requer grande volume de fluido, eficiência menor
Diesel	—	30,22 L de diesel	360.000	Motor de combustão interna, alta eficiência
Stirling	—	35,28 L equivalente de diesel	360.000	Motor de combustão externa, eficiência prática menor

Fonte: Elaborado pelo autor com base em simulações teóricas, 2025

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos principais ciclos termodinâmicos — Rankine, Brayton, Diesel, Stirling, Kalina e s-CO₂ — demonstra que cada um possui características próprias de eficiência, custo e aplicabilidade, refletindo a diversidade de soluções necessárias para atender à crescente demanda energética global. O Ciclo de Rankine mantém sua relevância pela robustez e adaptabilidade a diferentes combustíveis, enquanto o Brayton se destaca pela alta densidade de potência e integração em ciclos combinados.

O Diesel continua essencial em aplicações móveis e descentralizadas, e os ciclos emergentes, como Stirling, Kalina e s-CO₂, representam caminhos promissores rumo à sustentabilidade e ao aproveitamento de calor residual. Observa-se que a eficiência energética e a redução de impactos ambientais são objetivos centrais e complementares, dependentes da inovação tecnológica e da integração entre engenharia, economia e políticas públicas.

Conclui-se que o domínio e o aperfeiçoamento contínuo dos ciclos termodinâmicos são fundamentais para uma matriz energética mais limpa, segura e economicamente viável, contribuindo diretamente para a transição global rumo a um futuro sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

ALVARES, M.; OLIVEIRA, R.; COSTA, J. M. **Comparative analysis of thermodynamic cycles applied to sustainable power generation**. *Renewable Energy Journal*, v. 145, n. 2, p. 1250-1262, 2020.

QUOILIN, Sylvain; VAN DEN BROEK, Martijn; DECLAYE, Sébastien; LECLERCQ, Philippe; LEMAIRE, André. **Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 168-186, 2013.

SARAVANAMUTTOO, H. I. H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H.; STRAZNICKY, P. V. **Gas Turbine Theory**. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 139, n. 6, p. 061701-1–061701-10, 2017.

ZHANG, Hongwei; YANG, Yuchen; WANG, Shimin; ZHANG, Yan. **Performance assessment of combined Brayton–Rankine cycles with renewable heat integration.** *Energy Conversion and Management*, v. 209, p. 112633, 2020.