



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE ENSINO SUPERIORES DE CAXIAS - CESC
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA
CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA

MOISÉS DOS SANTOS GALVÃO

ESTUDO TEÓRICO EM MOTORES TÉRMICOS: FUNDAMENTOS E AVANÇOS
TERMODINÂMICOS PARA A OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

CAXIAS - MA
2025

MOISÉS DOS SANTOS GALVÃO

**ESTUDO TEÓRICO EM MOTORES TÉRMICOS: FUNDAMENTOS E AVANÇOS
TERMODINÂMICOS PARA A OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
junto ao curso de Física da Universidade
Estadual do Maranhão, Campus Caxias, como
requisito final para o grau de Licenciatura em
Física.

Orientador(a): Prof. dr. Iure Carvalho

**CAXIAS - MA
2025**

G182e Galvão, Moisés dos Santos

Estudo teórico em motores térmicos: fundamentos e avanços termodinâmicos para a otimização do desempenho energético / Moisés dos Santos Galvão. __Caxias: Campus Caxias, 2025.

76f.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão – Campus Caxias, Curso de Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Iure Carvalho.

- Motores térmicos. 2. Termodinâmica. 3. Eficiência energética. 4. Ciclos termodinâmicos. I. Título.

CDU 536.7

MOISÉS DOS SANTOS GALVÃO

**ESTUDO TEÓRICO EM MOTORES TÉRMICOS: FUNDAMENTOS E AVANÇOS
TERMODINÂMICOS PARA A OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
junto ao curso de Física da Universidade
Estadual do Maranhão, Campus Caxias, como
requisito final para o grau de Licenciatura em
Física.

Aprovado em: 18 / 07 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



IURE DA SILVA CARVALHO

Data: 28/07/2025 19:28:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. dr. Iure da Silva Carvalho - Orientador
Doutor em Física da Matéria Condensada
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Documento assinado digitalmente



GIOVANE DE SOUZA SILVA

Data: 28/07/2025 15:44:13-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. dr. Giovane de Souza Silva - Membro 1
Doutor em Física Teórica
Universidade Federal do ABC - UFABC

Documento assinado digitalmente



RICARDO GOMES

Data: 28/07/2025 15:03:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Ricardo Gomes - Membro 2
Mestre em Física Computacional
Universidade Federal do Piauí - UFPI

A Deus, pela vida, por guiar meus passos, me concedendo forças e alegria. À minha companheira Jeane, pelo amor, apoio e por estar ao meu lado nesta jornada. Ao meu saudoso avô José, que permanece vivo em minhas lembranças e no meu coração. Sua história e seus conselhos foram e sempre serão uma inspiração para mim, dedico este trabalho à sua memória.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Jesus Cristo, o meu Criador e Senhor. Ele me concedeu a vida, o conhecimento, a perseverança e a paz ao longo de toda esta jornada. Nos momentos de incerteza, Ele mostrou-me a direção e a sua fidelidade deu-me forças, a Sua graça renovou minha esperança diante dos desafios. Durante essa trajetória, pude ver que os planos Dele são perfeitos, basta confiar, pois Ele é bom e “Porque dele, por ele e para ele são todas as coisas” (Romanos 11:36, BÍBLIA, 2009). Honra e Glória sejam dadas a Jesus Cristo para sempre.

Agradeço a minha família, a quem Deus me deu como suporte e abrigo, dando amor e apoio que acompanharam-me desde o início. Aos meus pais, por me ensinarem a não desistir. Suas orações e palavras me sustentaram nos dias difíceis. À minha companheira, Jeane, que, nesses semestres finais dessa jornada, me tem dado carinho, paciência e apoio incondicional. O seu amor e presença foram, pra mim, uma resposta de Deus para meu coração.

Aos meus amigos, colegas, meus irmãos nessa jornada, agradeço a Andréia, Luziane, Emily, Bianca, Maria, Marcos, Felipe, Leonardo, Vitor, Márcio, Vanderson, João, Sandro, Quézia, Ana, Nádia, Cleane, Kariny, Tamara e Géssica, que compartilharam comigo os estudos, conhecimentos, risos, encorajamento e conquistas ao longo da graduação. A amizade e a convivência com vocês foi essencial, pois tornaram esta caminhada acadêmica mais leve e alegre. Que Deus abençoe a todos.

Aos professores do curso de Física Licenciatura, Ediomar, Paulo, Juliermes, a todos, minha sincera gratidão. As aulas, orientações e cada desafio proposto durante esses anos foram contribuição para minha formação profissional e pessoal. Vocês não ofereceram apenas os textos e fórmulas, mas também a aprendizagem efetiva, conhecimento, responsabilidade e paixão pela ciência. Ao meu orientador, Prof. Iure Carvalho, obrigado pela dedicação, pelo conhecimento científico e orientações durante o curso e no desenvolvimento deste presente trabalho. Agradeço à Uema pelo suporte e oportunidade oferecida. Deus abençoe a todos.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, obrigado. O que foi conquistado até aqui é fruto das bênçãos de Deus e de pessoas que Ele mesmo colocou neste meu caminho.

Por fim, registro com inteira convicção que, até o presente momento, o Senhor tem me ajudado (BÍBLIA, 2009).

“Todos os motores térmicos carregam, mesmo no oculto, uma grande verdade da Física: a Segunda Lei da Termodinâmica é, talvez, a mais inflexível das leis da natureza e, por isso, não pode ser contrariada.”

— *Inspirada em Arthur S. Eddington (1928).*

RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo teórico aprofundado sobre motores térmicos, fundamentado nos princípios da Termodinâmica. Abordamos a importância histórica da área, seus fundamentos físicos aplicados e os avanços recentes na busca por maior eficiência térmica. Para isso, são discutidos conceitos sobre os ciclos termodinâmicos clássicos, como Carnot, Otto, Diesel, Rankine, Brayton e Stirling, com foco na conversão de energia térmica em trabalho mecânico e nos limites impostos pelas leis da Termodinâmica. Nesse contexto, destaca-se o impacto das irreversibilidades (a exemplo do atrito e das dissipações térmicas) na geração de entropia e na consequente limitação da eficiência real desses sistemas. O estudo também inclui estratégias modernas de otimização da eficiência energética, contemplando a mitigação de perdas por meio da aplicação de revestimentos térmicos, do aperfeiçoamento dos ciclos operacionais e do emprego de materiais com alta resistência térmica. Além disso, a implementação de ferramentas de modelagem computacional e a aplicação da Termodinâmica de Tempo Finito (FTT) são apresentadas como bases essenciais para o desenvolvimento de motores mais eficientes e duráveis. Dessa forma, conclui-se que a Termodinâmica tem um papel crucial na otimização de motores térmicos e que estes continuarão sendo componentes fundamentais para a sociedade e para a engenharia moderna, evoluindo continuamente frente aos desafios de eficiência energética e ambientais.

Palavras-chave: Motores térmicos; Termodinâmica; Eficiência energética; Energia; Irreversibilidades; Ciclos termodinâmicos.

ABSTRACT

This work presents an in-depth theoretical study on heat engines, grounded in the principles of Thermodynamics. We address the historical importance of the field, its applied physical fundamentals, and recent advancements in the pursuit of higher thermal efficiency. To this end, concepts of classical thermodynamic cycles, such as Carnot, Otto, Diesel, Rankine, Brayton, and Stirling, are discussed, focusing on the conversion of thermal energy into mechanical work and the limits imposed by the laws of Thermodynamics. In this context, the impact of irreversibilities (e.g., friction and thermal dissipations) on entropy generation and the consequent limitation of these systems' real efficiency is highlighted. The study also includes modern strategies for optimizing energy efficiency, encompassing loss mitigation through the application of thermal coatings, the refinement of operational cycles, and the employment of high-temperature resistant materials. Furthermore, the implementation of computational modeling tools and the application of Finite-Time Thermodynamics (FTT) are presented as essential bases for the development of more efficient and durable engines. Thus, it is concluded that Thermodynamics plays a crucial role in the optimization of heat engines and that these will continue to be fundamental components for modern society and modern engineering, continuously evolving to face energy efficiency and environmental challenges.

Keywords: Thermal engines; Thermodynamics; Energy efficiency; Energy; Irreversibilities; Thermodynamics cycles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de um motor a vapor.....	19
Figura 2 – Esquema motor de combustão interna.....	20
Figura 3 – esquema Turbina a Gás.....	21
Figura 4 – esquema motor Stirling.....	22
Figura 5 - Diagrama Termodinâmico de uma máquina térmica.....	22
Figura 7 - Diagrama Pressão-Volume (P-V) do ciclo de Carnot, processos termodinâmicos reversíveis.....	28
Figura 8 - Diagrama PV do ciclo otto.....	30
Figura 9 - Diagrama PV do ciclo diesel.....	31
Figura 10- Apresentação do ciclo Rankine.....	33
Figura 11- Representação ciclo Brayton (aberto/fechado).....	35
Figura 12- Diagrama Pv (Pressão x Volume) do ciclo Stirling.....	36
Figura 13 - Diagramas P-v do ciclo Atkinson.....	38
Figura 14 - ciclo teórico de Miller.....	39
Figura 15 - Esquema CRO.....	49
Figura 16- Representação molecular da YSZ.....	52
Figura 17 - Biela na representação CFD.....	54
Figura 18 - Gráfico comparativo: eficiência de Carnot e Curzon-Ahlborn.....	58
Figura 19 - Comparação da eficiência térmica estimada de ciclos Otto, Atkinson e Miller sob o ponto de vista da Termodinâmica de Tempo Finito (FTT).....	62
Figura 20 - Brayton - Rankine combinado.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
Geral.....	14
Específicos.....	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 MOTORES TÉRMICOS E A TERMODINÂMICA.....	15
3.1.1 O Motor Térmico.....	15
3.1.2 Importância dos Motores Térmicos para a Sociedade Moderna.....	16
3.1.3 Breve Histórico dos motores térmicos.....	17
3.1.4 Os Tipos de Motores Térmicos.....	18
3.1.5 A Termodinâmica Aplicada Nos Motores Térmicos.....	22
3.2 EFICIÊNCIA, CICLOS, IRREVERSIBILIDADES.....	26
3.2.1 A Eficiência Energética.....	26
3.2.2 Ciclo de Carnot (o ciclo ideal).....	28
3.2.3 Ciclos Termodinâmicos Clássicos.....	29
3.2.3.1 Ciclo Otto.....	30
3.2.3.2 Ciclo Diesel.....	31
3.2.3.3 Ciclo Rankine.....	32
3.2.3.4 Ciclo de Brayton.....	34
3.2.3.5 Ciclo de Stirling.....	35
3.2.4 Ciclos Termodinâmicos Modernos.....	37
3.2.4.1 O Ciclo Atkinson.....	37
3.2.4.2 O Ciclo Miller.....	38
3.2.5 As Irreversibilidades (Perdas de Energia).....	40
4 METODOLOGIA.....	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 ESTUDOS E AVANÇOS DA TERMODINÂMICA PARA OS MOTORES TÉRMICOS RECENTES.....	45
5.1.1 Estratégias para Redução de Perdas de Energia.....	45
5.1.2 Aplicação do Ciclo Rankine Orgânico.....	49
5.1.3 Materiais Avançados.....	50
5.1.4 Avanços na Modelagem de Ciclos Reais.....	53
5.1.5 Aplicação da Termodinâmica de Tempo Finito.....	56
5.1.6 O Modelo de Eficiência de Curzon-Ahlborn.....	57
5.1.7 Ciclos Alternativos na Termodinâmica de Tempo Finito.....	60
5.1.8 Avanços em Ciclos Termodinâmicos Combinados.....	63
6 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Os motores térmicos, no decorrer da história, desempenharam um papel fundamental em relação a transformação da energia e desenvolvimento socioeconômico da humanidade e, pode-se dizer que os mesmos estão entre as mais transformadoras invenções da história feitas pelo homem. Esses sistemas são responsáveis pela conversão de calor em trabalho mecânico, o que os torna essenciais em setores como transporte, geração de energia e indústria (MORAN; SHAPIRO, 2018). Desde o início, com os primeiros dispositivos a vapor, como James Watt, no século XVIII, com o aperfeiçoamento da máquina a vapor, e, do período da Revolução Industrial até os motores de combustão interna(MCI) modernos, a sua evolução está relacionada diretamente com os avanços no entendimento e aplicação dos princípios da termodinâmica.

A termodinâmica é uma área da física que estuda as relações entre calor, trabalho e energia, sendo ela fundamental para a compreensão do funcionamento dos motores térmicos. Sob a visão da mesma, esses sistemas são analisados com base em leis, modelos e ciclos termodinâmicos que descrevem como a energia é absorvida, transformada, utilizada e perdida. A Primeira Lei da Termodinâmica, que trata da conservação da energia, estabelece que a energia total em um sistema isolado é constante, sendo transformada de uma forma para outra, ou seja, traz uma base para um balanço energético dentro do sistema. Em relação a Segunda lei, a mesma oferece uma dimensão mais realista e crítica, pois introduz o conceito de entropia, irreversibilidades e mostra a direção natural dos processos energéticos, impondo certas fronteiras à eficiência total dos sistemas reais (MORAN; SHAPIRO, 2018). Por essa razão, é justamente esta lei que traz certas restrições ao aproveitamento total e ideal da energia, o que faz surgir, inevitavelmente, perdas de energia térmica, essas manifestadas, em grandes parcelas, como calor dissipado no ambiente (MORAN; SHAPIRO, 2012).

Essas irreversibilidades surgem de fatores como atrito mecânico, perdas por transferência de calor, resistências térmicas, combustões incompletas e processos não-quase-estáticos. Tais elementos reduzem significativamente a eficiência dos motores e representam desafios constantes na busca por sistemas mais otimizados. Outro princípio termodinâmico que nasce no estudo dos motores térmicos é sobre os Ciclos termodinâmicos (Carnot, Otto, Diesel, Rankine e Stirling), eles são aplicados nesses sistemas como pilares de funcionamento de distintos tipos de motores ou máquinas térmicas (GE et al., 2006).

Os desafios atuais com relação à eficiência energética, sustentabilidade e minimização de perdas de energia tendem a colocar a termodinâmica novamente em

evidência nas pesquisas como uma área de resultados essencial na evolução desses sistemas. Nesse cenário, surgem problemáticas contemporâneas que motivam mais estudos teóricos e experimentais. Entre elas, tem-se a tensão entre a busca por um maior rendimento térmico e a minimização das perdas energéticas, sem comprometer a durabilidade, a segurança e o custo de operação dos motores.

Apesar dos desafios impostos pelas leis naturais, a última década tem sido marcada por significativos avanços teóricos e tecnológicos voltados à otimização da eficiência dos motores térmicos. Os ciclos combinados, melhorias na gestão térmica, uso de materiais de alto desempenho, ou seja, resistência maior ao calor, sistemas regenerativos de energia, combustíveis alternativos e a incorporação de controle eletrônico inteligente têm sido uma exploração para caminhos viáveis no controle de perdas de energia e ampliação da eficiência (ROSEN; DINCER, 2020).

Seguindo essa perspectiva científica de pesquisas, originou-se uma nova vertente analítica conhecida como Termodinâmica de Tempo Finito (*Finite Time Thermodynamics – FTT*). Nesse contexto, a FTT recebe atenção ao permitir modelagens mais realistas dos processos térmicos, levando em consideração limitações práticas como o tempo finito de transferência de calor e gradientes finitos de temperatura (WU et al., 2022). Esse tipo de abordagem tem se mostrado com eficácia em análise nos motores térmicos, permitindo uma determinação de limites de eficiência bem próximos da realidade, como o exemplo da eficiência de Curzon-Ahlborn (ANGULO-BROWN, 1991).

A Termodinâmica, como um ramo fundamental dentro da Física, mostra os princípios necessários para compreender e melhorar o desempenho de sistemas térmicos. Dessa forma, o presente estudo tem justificativa na necessidade de aprofundamento teórico acerca dos motores térmicos. Tais sistemas apresentam desempenho limitado por irreversibilidades inerentes aos processos termodinâmicos, nesse sentido, a compreensão dos ciclos reais, aliada à aplicação de modelos teóricos contemporâneos, como a Termodinâmica de Tempo Finito (FTT), revela-se essencial para a identificação de limites de eficiência e para a criação de estratégias de otimização de energia. Ao articular fundamentos físicos rigorosos com avanços recentes da literatura científica, este estudo pode contribuir para a consolidação de uma formação acadêmica mais crítica no campo da Física e uma compreensão mais abrangente das interações entre termodinâmica, energia e sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

Geral

- Estudar sob uma perspectiva teórica os avanços recentes na termodinâmica aplicados aos motores térmicos, com foco na otimização para o aprimoramento do desempenho energético.

Específicos

- Analisar os fundamentos teóricos da termodinâmica clássica e moderna aplicados aos motores térmicos.
- Identificar os principais ciclos termodinâmicos utilizados na modelagem dos motores, destacando suas características e eficiências.
- Investigar os efeitos das irreversibilidades nos ciclos reais e como essas perdas impactam o rendimento energético dos motores.
- Examinar estratégias recentes de mitigação de perdas energéticas, como a aplicação da termodinâmica de tempo finito, uso de materiais avançados, recuperação de calor residual e otimização de processos.
- Refletir sobre a relevância dos motores térmicos no contexto atual de transição energética e sustentabilidade.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MOTORES TÉRMICOS E A TERMODINÂMICA

3.1.1 O Motor Térmico

O motor, sob uma análise científica, é um dispositivo (máquina) que converte energia (química, térmica, elétrica, etc.) em trabalho mecânico, ou seja, em movimento. Entre os tipos de motores mais comuns estão os motores térmicos, elétricos e hidráulicos ou pneumáticos. Com foco nos motores térmicos, que são dispositivos projetados para converter energia térmica em trabalho mecânico útil e, eles podem ser classificados, de forma geral, em dois grandes grupos: motores de combustão interna e motores de combustão externa, baseando-se em princípios fundamentais da termodinâmica.

Çengel e Boles (2015, p. 468) relata que:

Os motores térmicos são dispositivos nos quais o calor é transformado em trabalho, e o desempenho desses sistemas é descrito por ciclos que obedecem às leis da termodinâmica. Os mesmos devem obedecer à Segunda Lei da Termodinâmica, e isso implica que parte do calor recebido de uma fonte quente deve ser rejeitado a uma fonte fria.

Em sua forma mais comum, como nos motores de combustão interna (MCIs), a energia química contida em um combustível é transformada em calor por meio da combustão, elevando a temperatura e a pressão de um fluido de trabalho. Em uma melhor compreensão, todos eles compartilham características comuns; uma absorção de calor, onde o motor recebe energia térmica de uma fonte de alta temperatura; transformação em trabalho, ao absorver calor, o fluido de trabalho (como ar, gás, vapor ou uma mistura deles) aumenta sua energia interna, com isso esse fluido em expansão realiza trabalho ao mover um pistão ou uma turbina, transformando o calor em energia mecânica; e rejeição de calor, após realizar trabalho, o fluido perde parte de sua energia térmica para um dissipador de baixa temperatura.

O processo de funcionamento desses motores está fortemente ligado à Primeira Lei da Termodinâmica, que traz menção à conservação da energia e também à Segunda Lei, que coloca limites para com a conversão total de calor em trabalho por causa da geração de entropia. Os motores térmicos funcionam através de ciclos repetitivos que podem ser fechados, como o ciclo de Carnot e Stirling ou abertos, como os ciclos Otto e Diesel (CARVALHO, 2016).

3.1.2 Importância dos Motores Térmicos para a Sociedade Moderna

Os motores térmicos têm desempenhado uma ação de trabalho indispensável junto a infraestrutura de energia e produção na sociedade contemporânea, os mesmos são os responsáveis pela transformação de calor em trabalho mecânico em muitos setores, desde a mobilidade urbana até a geração de energia elétrica. Com o domínio científico e aplicações de princípios da termodinâmica, em especial, ciclo de Carnot e as leis da termodinâmica, esses dispositivos (máquinas) tem deixado mais viável o desenvolvimento de tecnologias, começando na Revolução Industrial até as mais detalhadas cadeias de produção do presente futuro (MA; ZHAO, 2024).

No século XXI, os motores térmicos ainda representam uma fração significativa dentro da matriz da energia global, onde eles têm operação nas usinas termelétricas, automóveis, navios, setor aéreo, transporte ferroviário e nas indústrias. Mesmo em meio aos avanços de tecnologias de caráter renovável e junto à elevada pressão pela descarbonização, os motores térmicos tem permanência essencial nas aplicações que possuem uma demanda alta em densidade energética e na confiabilidade de operação. Ademais, pesquisas atuais mostram que, no ano de 2020, com uma aproximação de cerca de 80% do transporte mundial, que inclui os veículos leves e pesados, as aeronaves e o setor marítimo, ainda tinham dependência forte dos motores de combustão interna (MCI) ou turbinas térmicas (IEA, 2021).

Sobre as fortes demandas energéticas, muitas usinas termelétricas modernas passaram a utilizar ciclos combinados, em exemplo, Brayton-Rankine, no objetivo de aumentar de forma significativa a eficiência do globo em conversão de energia, alcançando assim valores perto de 60%, isso dependendo de certas configurações de operação (Rosen; Dincer, 2020). A integração de modelos de FTT tem deixado uma permissão no projetar de motores térmicos com mais eficiência e um menor impacto no ambiente, deixando-os em compatibilidade com os biocombustíveis, etc (Wu et al., 2022; Chen; Sun, 2020).

Dessa forma, não representando uma tecnologia “obsoleta”, os motores térmicos têm evoluído em resposta aos requerimentos energéticos, econômicos e ambientais. Portanto, os tais progressos deixam em evidência que os motores térmicos não podem ser considerados apenas por “vestígios de um modelo energético passado”, mas sim um sistema de conversão de energia em constantes desenvolvimentos para um equilíbrio em termos energéticos e de sustentabilidade aceitáveis (ZHANG et al., 2024).

3.1.3 Breve Histórico dos motores térmicos

A história dos motores térmicos é um relato interessante na aplicação da ciência e que está relacionado com a própria evolução da civilização, marcado por importantes transformações econômicas, sociais e tecnológicas na sociedade. Tem-se início na antiguidade, com “experimentos rudimentares” demonstrando a aplicação do calor para realizar trabalho, culminando assim na revolução industrial, pois os motores térmicos se tornaram o coração pulsante da nova era industrializada (Smith, 1978).

Os primeiros indícios históricos mostram que os motores térmicos, mesmo com algum conceito rudimentar, começaram a fazer parte da curiosidade humana com experimentos de Herão de Alexandria por volta do século I. Ele gerou a "*Aeolipile*", um dispositivo que convertia o vapor em movimento rotatório. Embora sem aplicação prática naquela época, deu início à compreensão de que o calor poderia, de alguma forma, ser transformado em trabalho mecânico (CRUZ et al, 2020).

Segundo Baldow e Monteiro (2010, p.04) “A revolução industrial constituiu-se, sem dúvida, em um dos principais fatores externalistas para o desenvolvimento da física e, em particular, da termodinâmica nos séculos XVIII e XIX.”, verdadeiramente, o uso na prática, dos motores térmicos ocorreu séculos depois, no século XVII, quando as muitas necessidades econômicas e no setor industrial começaram a crescer de forma rápida. A primeira máquina a vapor prática foi desenvolvida por Thomas Savery em 1698, para bombear água na área de mineração, todavia, ele não desenvolveu essa máquina térmica para fins gerais, mas a sua invenção deu fundamento do conceito sobre as máquinas movidas a vapor (Jenkins, 1983).

Ademais, Thomas Newcomen também construiu uma máquina térmica, entretanto, essa usava mais baixa a pressão. Porém, a máquina de Newcomen ainda não era eficaz por completo, pelo motivo de reiniciar o seu processo e precisar que o vapor de condensação inserido no cilindro fosse aquecido novamente, de forma contínua, e com isso havia uma grande perda de calor (SOUSA, 2021).

Posteriormente, James Watt, na segunda metade do século XVIII, foi quem fez os mais significativos avanços no desenvolvimento dos motores térmicos. Ele adicionou muitas melhorias essenciais no projeto de motores a vapor, isso não apenas aumentou a eficiência, mas também tornaram esses motores mais confiáveis e, economicamente, viáveis para aplicações. As inovações de Watt incluíram o uso de um condensador separado, que evitou grandes perdas de energia térmica e também o desenvolvimento do movimento rotatório por meio do movimento alternativo de seus motores (VATIN, 2018).

No século XIX, o impacto das máquinas a vapor foi monumental, elas permitiram a mecanização nas muitas indústrias, desde a têxtil até o transporte ferroviário e naval. Mediante a consagração desses motores, também surgiram outros novos desafios, principalmente em relação à eficiência energética e na segurança operacional. Com isso, impulsionou-se uma maior “compreensão e teorização” dos princípios termodinâmicos. No início do século XX, houve uma nova era de inovação com o desenvolvimento dos motores de combustão interna (MCI), que ajudaram no impulso do transporte terrestre, aéreo e marítimo.

Por serem mais leves e compactos do que as máquinas a vapor, os motores de combustão interna passaram a ser dominantes principalmente por causa da sua densidade de potência superior e uma eficiência otimizada (*History of Internal Combustion Engines*, 1920). No andar dos anos, a evolução dos motores térmicos foi marcada por avanços tecnológicos, incluindo a introdução de novas práticas e materiais no design dos motores no objetivo de melhorar a eficiência e a durabilidade. Sobre essas novas aplicações, as turbinas a gás e os motores a jato, por exemplo, são “desdobramentos” tecnológicos que ampliaram grandemente a aplicação dos motores térmicos para velocidades e potências que eram impensáveis no passado.

No presente, existe a continuação com os imparáveis esforços em pesquisa e desenvolvimento no intuito de aprimorar a eficiência dos motores térmicos e também minimizar o impacto ambiental. Os motores híbridos e a exploração de combustíveis alternativos são algumas outras áreas que recebem atenção significativa, fundamentando o papel crucial dos motores térmicos no desenvolvimento econômico e na busca por um futuro mais sustentável (*Energy Research and Development*, 2020).

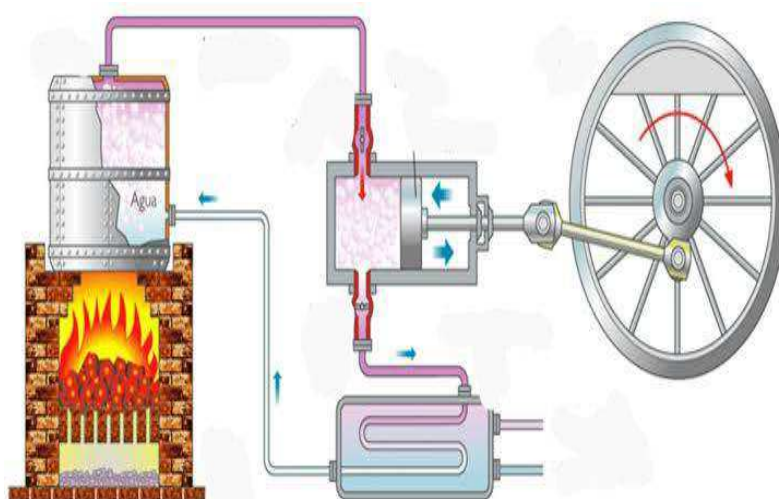
3.1.4 Os Tipos de Motores Térmicos

O número de motores térmicos presentes na engenharia atualmente deixa claro a multiplicação de demandas energéticas ocasionadas por diferentes setores da sociedade. Esses dispositivos, com função principal de conversão de energia térmica em trabalho mecânico, ou seja, energia mecânica, vão está classificados de acordo com “parâmetros físico-tecnológicos”, em exemplo, o tipo de fluido de trabalho (gás ou vapor), como é a natureza da fonte térmica? (combustão interna ou externa) e o tipo de ciclo termodinâmico que vai está operando (Otto, Diesel, Rankine e Brayton).

Entre os tipos com mais representatividade, tem-se os motores a vapor, que são submetidos pelo ciclo Rankine; os motores de combustão interna (MCI), que operam com os ciclos Otto ou Diesel; as turbinas à gás, que tem base de funcionamento no ciclo Brayton; e os motores Stirling, com o funcionamento envolvendo um “ciclo regenerativo fechado”, contendo trocas de calor externas, “compressão e expansão isotérmicas ou quase isotérmicas” (ÇENGEL; BOLES, 2019; VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003).

No passado, os motores com princípio de movimento através do vapor (fig. 1) foram os tipos motores térmicos utilizados em grande número, principalmente na época da Revolução Industrial. Esse tipo de motor tem operação por meio do ciclo de Rankine, esse processo começa quando a água é aquecida até o momento de vaporização, se inicia uma expansão e realização de trabalho sobre um pistão ou turbina. Depois da expansão, o vapor é condensado e volta para a fase líquida e assim se reinicia o ciclo. Os mesmos foram de grande importância para a mecanização de indústrias e setor de transportes, como as ferrovias e navios, mesmo com sua eficiência limitada e o grande tamanho (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2020).

Figura 1- Esquema de um motor a vapor

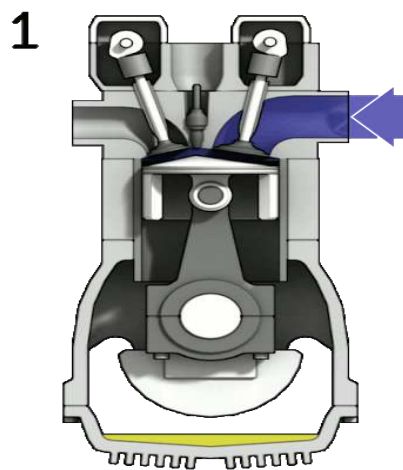


Fonte: Moura 2017.

Os Motores de Combustão Interna (MCI), esquematizado na fig. 2, estão representando um grande passo em parâmetros de “compacidade e eficiência” no momento presente. Eles têm operação em dois ciclos principais, o ciclo Otto e o ciclo Diesel. O ciclo Otto é usado principalmente em veículos pequenos, existe a utilização de uma mistura de ar e combustível, a mesma é comprimida e depois é então inflamada por uma faísca.

Já no ciclo Diesel, que é usado em veículos mais pesados e também em veículos industriais, utiliza-se de uma compressão do ar para chegar ao ponto de elevar a temperatura o suficiente para criar a inflamação do combustível sem que haja a utilidade de uma faísca. Os MCIs tem uma razoável eficiência e os mesmos têm uma melhor versatilidade, todavia, com o seu uso em grande proporção, cria debates ambientais em relação à emissão de poluentes (HEYWOOD, 2018).

Figura 2 – Esquema motor de combustão interna

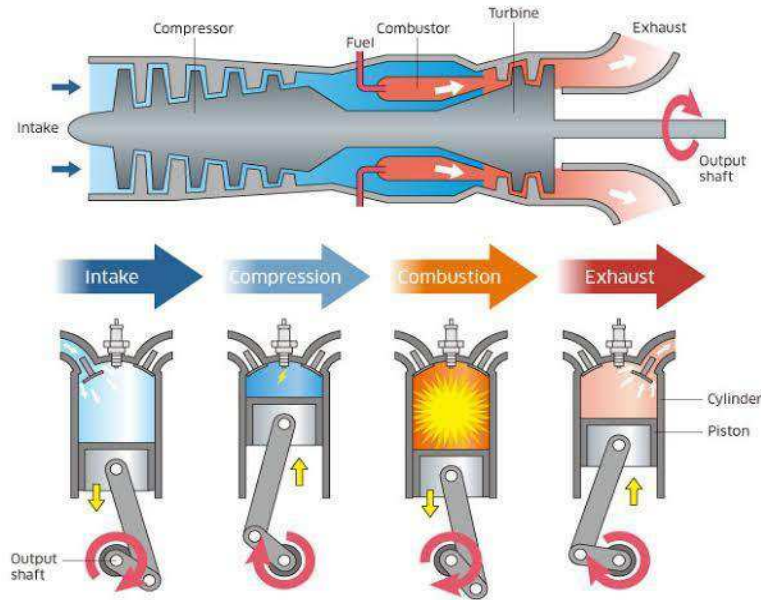


Fonte: Wikimedia commons 2018.

As turbinas a gás, esquematizada na fig. 3, são conceitualmente semelhantes aos motores a jato e são amplamente utilizadas em instalações de geração de eletricidade e em aeronaves a jato. O ciclo que descreve o funcionamento dessas turbinas é Brayton, neste, o ar comprimido tem mistura junto com o combustível e depois é queimado através de pressão, com isso, os gases altamente quentes resultantes geram movimento nas lâminas de uma certa turbina (KLEIN et al., 2024).

Como resultado, existe a geração de uma energia rotacional que vai ser utilizada para a propulsão ou no movimento para gerar eletricidade. Esses tipos de motores, destacam-se por sua alta “razão potência-peso” e também pela eficiência em atingir grandes potências, contudo, podem ser menos eficientes em escalas menores (GIAMPAOLO, 2014).

Figura 3 – esquema Turbina a Gás

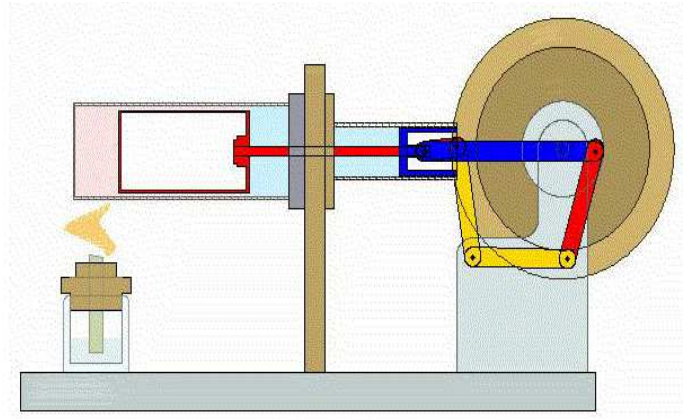


Fonte: Kawasaki Heavy Industries 2025.

Sendo dispositivos térmicos com combustão externa, os motores Stirling, esquematizado na fig. 4, operam de acordo com um ciclo termodinâmico fechado e regenerativo, o ciclo Stirling, que é caracterizado por processos sendo quase isotérmicos de compressão e expansão, que são combinados com uma regeneração interna de calor. O fluido de trabalho (hélio ou ar) permanece preso hermeticamente no sistema, fornecendo uma transferência de energia térmica entre fontes quentes e frias através de trocadores de calor. O ciclo presente nesse motor tem aproximação perto do limite superior de eficiência, que é definido pelo ciclo de Carnot, devido os seus processos térmicos serem regidos numa maneira quase reversível.

Entretanto, para a realização prática dessa eficiência, existe a necessidade de um estudo termodinâmico e engenharia avançada em relação ao isolamento térmico, materiais com alta condutividade e um controle mais preciso durante as fases do ciclo. Mesmo que a sua aplicação comercial seja restrita, os motores Stirling causam um interesse crescente em setores que requerem uma operação silenciosa, uma eficiência viável, como em sistemas solares concentrados e propulsão submarina (SEARS; TAYLOR, 2020).

Figura 4 – esquema motor Stirling

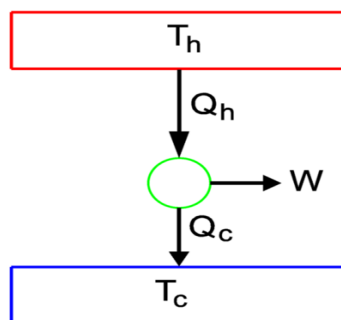


Fonte: Pedro Ney (2020).

3.1.5 A Termodinâmica Aplicada Nos Motores Térmicos

A compreensão dos motores térmicos exige um certo domínio de alguns fundamentos da termodinâmica, os quais explicam como a energia térmica pode ser transformada em trabalho útil.

Figura 5 - Diagrama Termodinâmico de uma máquina térmica



Fonte: Wikipedia (2024).

Os motores térmicos reais funcionam a partir da transferência de calor de uma fonte quente (temperatura T_h) para uma fonte fria (temperatura T_c), realizando trabalho mecânico (W) ao longo do processo. O diagrama representado na fig. 5 ilustra esse funcionamento básico: o sistema absorve calor Q_h da fonte quente, transforma parcialmente essa energia em

trabalho, e rejeita o restante como calor Q_c para a fonte fria. Esse processo irreversível fundamenta a operação de ciclos termodinâmicos como Carnot, Otto, Diesel e Rankine, e demonstra que sempre haverá uma limitação intrínseca à eficiência, imposta pelas restrições naturais de conversão energética. Esse tipo de conversão é regido por meio de restrições físicas impostas pelas leis da termodinâmica, especialmente pela irreversibilidade dos processos reais (ÇENGEL; BOLES, 2019).

A termodinâmica é uma área da física associada com o estudo de relações presentes entre calor, trabalho e energia em muitos sistemas naturais e também artificiais. Os seus princípios ou leis são fundamentais no desenvolvimento e otimização dos motores térmicos, pois esses são máquinas que tem uma operação dependente de transformação de energias, ou seja, energia térmica se transformando em energia mecânica e, eles são projetados de acordo com leis fundamentais, no objetivo de maximizar a eficiência energética e minimizar as perdas de energia (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2020).

O “sistema termodinâmico” é um dos conceitos primordiais da termodinâmica, o mesmo tem definição de uma parte do universo sob análise, essa fica sendo limitada por limites (fronteiras reais ou imaginárias). Esses tipos de sistemas conhecidos têm relação com suas “vizinhanças” compartilhando energia e matéria, eles podem ser classificados como sistemas isolados, fechados ou abertos (fig. 6), todavia, os mesmos dependem das trocas de energia na qual estão realizando.

Figura 6 - Sistemas termodinâmicos: isolado, fechado e aberto.



Fonte: Ilustração digital gerada por inteligência artificial com adaptação em representações clássicas em livros de Termodinâmica (2025).

Os motores térmicos são geralmente considerados como “sistemas abertos”, pois trocam tanto calor quanto massa com o ambiente, por exemplo o combustível que entra e os gases que são liberados no escape. No entanto, em certas análises teóricas, pode-se ter a modelagem de um motor como um sistema fechado, especialmente quando se deseja estudar apenas a conversão de energia, desconsiderando a entrada e saída de massa. Em relação ao sistema isolado, o mesmo é uma idealização que não se aplica de forma direta aos motores reais, mas pode ser usado como uma referência para limites teóricos, como no estudo do ciclo de Carnot.

Na ideia de Callen (1985), compreender essas trocas é fundamental para o desenvolvimento de modelos matemáticos e físicos que podem explicar o comportamento dos motores térmicos (máquinas térmicas) em funcionamento. Essa distinção de sistemas é essencial para entender como podem ocorrer as trocas de energia e matéria durante o funcionamento do motor. Nas muitas das concepções modernas, os motores térmicos tem funcionamento com base em princípios de equilíbrio e nas mudanças de estado dentro de um sistema fechado.

O primeiro princípio da termodinâmica, frequentemente referido como a lei da conservação da energia, estabelece que a energia não pode ser criada ou destruída em um sistema isolado (MORAN; SHAPIRO, 2018). Nesta ideia, a quantidade total de energia presente em um sistema isolado tende a permanecer constante, mesmo que essa possa ser convertida entre calor e trabalho produzido, nos motores térmicos, isso tem significado de que o trabalho produzido não pode ultrapassar a energia térmica colocada no sistema (Carnot, 1824). Matematicamente, a primeira lei é expressa como

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

sendo ΔU a variação da energia interna, Q o calor fornecido ao sistema, e W o trabalho realizado (ÇENGEL; BOLES, 2019). Na explicação de Smith e Van Ness (2007), nos motores térmicos, essa lei é introduzida no caminho matemático da eficiência energética, que vai representar uma parcela da energia térmica transformada realmente em trabalho aproveitável.

Em ciclos como o de Otto ou Diesel, a eq. 1 permite calcular a quantidade de energia da combustão (calor Q) que é efetivamente transformada em trabalho W , e a quantidade que fica sendo como aumento da energia interna (ΔU), que geralmente é liberada depois como calor perdido. Isso é essencial para avaliar o rendimento térmico e propor melhorias no motor.

Ademais, o segundo princípio (a segunda lei da termodinâmica) coloca o conceito de entropia em um sistema, uma medição da irreversibilidade dos processos naturais e dos "custos energéticos" para a conversão de calor em energia mecânica. Essa lei tem um fundamento de que a entropia (desordem) por completo de um sistema isolado aumenta inevitavelmente ou permanece constante permanentemente e a mesma nunca tem diminuição.

$$\Delta S \geq 0$$

onde ΔS é a variação da entropia. Para um processo reversível tem-se $\Delta S=0$ e para um processo irreversível (real) $\Delta S>0$. Isso dá início a concepção de que todas as transformações de energia nos motores são, inevitavelmente, seguidas por perdas de energia. A Segunda Lei da Termodinâmica, segundo Kelvin-Planck, impede a conversão total de calor em trabalho, e segundo Clausius, proíbe a transferência espontânea de calor do frio para o quente (ÇENGEL; BOLES, 2019). Nisto, a segunda lei da termodinâmica impõe as diretrizes para a “direção dos processos” e fixa a inevitabilidade da perda de energia por meio das irreversibilidades nos processos reais, colocando assim os limites teóricos para a eficiência dos motores (Ricardo & Santoro, 2023).

Além disso, a segunda lei evidencia que sempre vai existir uma concentração de energia que não vai poder ser transformada em trabalho útil, ou seja, energia mecânica, criando um certo “limite superior teórico” para a aquisição da eficiência energética dos motores térmicos. De acordo com o teorema de Carnot, não pode haver um motor térmico sendo mais eficiente de que o motor carnotiano, que está operando entre as mesmas temperaturas, logo, essa concepção é essencial para a termodinâmica avançada e a engenharia térmica nos motores, pois leva para o pensamento e desenvolvimento de outros princípios físicos e tecnologias que visa a minimização das perdas energéticas inevitáveis (Atkins e De Paula, 2006).

Como complemento, um tópico também importante a ser mencionado em relação à segunda lei, é do ciclo termodinâmico, visto que dá continuação das transformações em que um fluxo de trabalho pode sofrer no interno de um motor térmico, voltando-o outra vez para o seu estado inicial. No intuito de entender a operação de um motor térmico, é de necessidade dar importância ao ciclo operacional a que o mesmo está submetido. No motor de combustão interna, por exemplo, o ciclo corresponde na admissão, compressão, combustão, expansão e exaustão, essas etapas mostram o uso prático dos princípios termodinâmicos e apresentam os momentos onde a perda de energia pode ser amenizada, mesmo nunca sendo eliminada por completo, por causa das perdas por entropia e uma resistência ao fluxo dos gases (Bejan, 2016).

Em relação aos ciclos termodinâmicos, os mais conhecidos são os de Carnot, Rankine e Otto, os mesmos são relevantes para um plano de estudo sobre os motores térmicos. Em uma concepção feita por Oliveira (2020), o ciclo de Carnot é visto como um padrão de eficiência mais viável para o funcionamento dos motores térmicos, visto que ele opera entre duas temperaturas diferentes e fica perto da melhor e máxima eficiência física e teórica existentes. Mediante a aplicação desses conceitos da termodinâmica em motores térmicos têm assegurado avanços satisfatórios em relação à eficiência, todavia, ainda desafia os engenheiros na superação de limitações naturais colocadas por leis termodinâmicas.

Através de recursos como a melhoria dos ciclos de funcionamento e com inovação de materiais, melhor resfriamento e no isolamento térmico, o conhecimento científico, mediante a princípios da física, tem evolução, o mesmo vem oferecendo esperanças de um futuro onde a eficiência energética possa se alinhar com objetivos de conservação ambiental. O entendimento eficaz destes conceitos termodinâmicos não vai apenas ajudar na avaliação do desempenho de motores térmicos atuais, como também irá proporcionar uma ideia firme para fazer frente aos desafios e explorar as oportunidades em relação às perdas de energia e continuar nos avanços a um ritmo que atende às crescentes demandas de energia.

3.2 EFICIÊNCIA, CICLOS, IRREVERSIBILIDADES

3.2.1 A Eficiência Energética

A eficiência energética nos motores térmicos é um tópico de relevância dentro da termodinâmica aplicada, visto que existe o seu impacto direto na economia de combustível, na redução de emissões e sustentabilidade. Em um motor térmico, a eficiência se dá em relação à uma parte da energia térmica que é convertida em trabalho útil, e que, segundo Assunção e Andrade (2021, p. 20), em termos de cálculo, “a eficiência térmica (η) de qualquer motor térmico é dada pela razão entre o trabalho (W) e a entrada de calor (Q), e para calcular a eficiência térmica, os engenheiros costumam usar entalpia”. Essa mesma, é afetada por limitações teóricas e desafios técnicos práticos.

Na visão teórica, a melhor eficiência que um motor térmico pode obter é projetada pelo ciclo de Carnot, estabelecendo um limite ideal que tem base, por completo, na diferença de temperatura que existe entre as fontes quente e fria em operação no motor. Todavia, a idealização deste ciclo é praticamente impossível de replicação em dispositivos reais devido

às muitas irreversibilidades ligados aos processos físicos em envolvimento, como a fricção, trocas de calor parasíticos e limites mecânicos do material (KROETZ, 2024).

Verdadeiramente, a eficiência dos motores térmicos é bem abaixo da eficiência de Carnot. Como por exemplo, os motores de combustão interna, operando no ciclo otto, tem uma eficiência termodinâmica média nos automóveis mais modernos variando entre 25% e 30%, e, para motores de ciclo Diesel, a eficiência pode ser maior que 40%, por meio da taxa de compressão mais alta, o que permite um melhor aproveitamento do calor (energia térmica) gerado (LIU et al., 2018). As turbinas a gás e os centrais com ciclos combinados podem chegar a eficiências superiores aos 60%, isto é devido à combinação de ciclos termodinâmicos e o aproveitando da energia residual (DE SOUZA et al., 2022).

Além das limitações teóricas, os fatores técnicos também impedem a maximização da eficiência dos motores térmicos. O modelo físico de motores tem o envolvimento de relações entre a eficiência, durabilidade, custo, e complexidade da produção. Nesta razão, a fricção mecânica, resistência aerodinâmica, repasse de calor indevido e o espalhamento de energia por meio dos ruídos e vibrações são considerados os “obstáculos físicos” que vão reduzir, na prática, a eficiência. Com esses desafios, novos materiais com propriedades térmicas melhores e menos afetados à corrosão, são consistentemente estudados e utilizados para diminuir essas perdas (CARVALHO, 2011).

Outro caminho para compreender as limitações de eficiência está na recuperação de calor não aproveitado, pelo que os sistemas de recuperação como as turbinas a vapor em centrais elétricas podem aumentar a eficiência total do sistema no momento da conversão do calor que não é utilizado em trabalho mecânico adicional. Outrossim, as tecnologias de recolha regenerativa e reciclagem dos gases de saída nos motores também são considerados como “caminhos” para melhorias na eficiência energética (MORAWSKI, 2016).

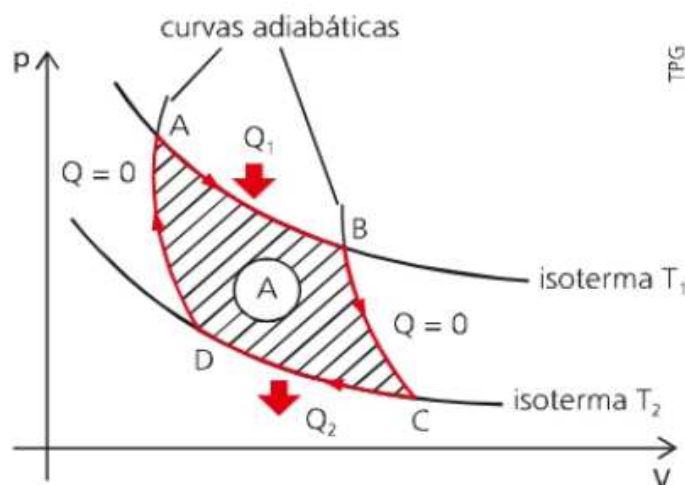
No contexto ambiental, melhorar a eficiência energética nos motores térmicos é uma ponte para minimizar as emissões de CO₂ e outros poluentes, visto que, melhorar também a eficiência do combustível não só mostra benefícios econômicos, mas contribui para o controle do aquecimento global e mudanças climáticas. A incorporação de combustíveis, em exemplo, o hidrogênio e sua mistura com o etanol, leva a um desafio em estudos dentro da termodinâmica avançada e outras áreas, no âmbito de como melhorar e segurar eficiências altas no momento em que mantêm um ciclo de combustão estável e limpo (AWOGBEMI, 2021).

3.2.2 Ciclo de Carnot (o ciclo ideal)

Ocupando um lugar no centro da termodinâmica, o ciclo de Carnot fica simbolizando um modelo de operação para um motor térmico ideal. Idealizado em 1824, por Sadi Carnot, o mesmo demonstra uma “série teórica de processos” que vão definir uma eficiência de energia máxima em que um motor térmico pode chegar quando opera entre duas diferentes temperaturas (Carnot, 1987).

Em termos práticos, existe uma “referência vital” na descrição do ciclo de Carnot, utilizada, continuamente, para a avaliação e desenvolvimento de tecnologias modernas para a busca de eficiências energéticas melhores.

Figura 7 - Diagrama Pressão-Volume (P-V) do ciclo de Carnot, processos termodinâmicos reversíveis.



Fonte: todoestudo.com.br/fisica/ciclo-de-carnot (2025).

O ciclo de Carnot tem a sua composição em quatro momentos de operações: 2 (dois) em transformações isotérmicas e 2 (dois) nas adiabáticas conforme representado na figura 7. No decorrer da transformação isotérmica de expansão, existe a absorção de calor de uma fonte quente feita pelo gás do sistema, realizando assim uma parcela de trabalho de acordo com uma medida que aumenta em temperatura constante. Na continuação do processo, a etapa 2 (dois) passa por uma expansão adiabática, nesta, não existe um compartilhamento de calor entre o sistema e ambiente, logo, mesmo com isso, o mesmo continua a expandir-se e com diminuição de sua temperatura (KROETZ, 2024).

Na sequência, no ciclo se manifesta uma compressão isotérmica, nesta, no ponto em que o trabalho é realizado sobre o sistema, existe liberação de calor direto para uma fonte

fria, essa com a temperatura constante, resultando assim, em uma compressão. No último momento do ciclo, o mesmo é completado pela compressão adiabática e, como consequência, aumenta a temperatura do sistema ao seu estado de origem, todavia, não existe compartilhamento de calor para com o ambiente (KROETZ, 2024).

Em síntese, a eficiência de energia no ciclo de Carnot vai depender, unicamente, de duas temperaturas nos depósitos térmicos, formulando que os motores, em operação entre mesmas temperaturas, compõem-se da mesma eficiência teórica máxima, e não depende da substância pelo qual é utilizada como fluido de trabalho. Logo, a equação de eficiência de Carnot fica demonstrada como

$$n = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (2)$$

em que T_c é a temperatura da fonte fria e T_h a fonte quente (LADINO et al., 2016). Nisto, a eq. 2 mostra que não é possível alcançar 100% de eficiência, e que ela fica sendo a melhor em termos de aquisição, revelando também que não há um dispositivo real que possa superar a eficiência de Carnot operando em condições térmicas iguais (Callen, 1985).

Embora seja uma teoria de difícil compreensão, o ciclo de Carnot colocou uma base fundamental em relação ao avanço da termodinâmica, tanto na área de experimentos quanto na prática. Na realidade, verdadeiramente, nenhum motor consegue atingir acima da eficiência do ciclo de Carnot ou, por análise, ficar paralelamente, pois há a existência de limitações na permutação de calor e nos estados de atuações reais. Além disso, esses processos de compressão e expansão ideais deixam desafios para físicos e engenheiros, no momento da busca e desenvolvimento de soluções que podem abeirar ao máximo as eficiências de energia teóricas e práticas presentes nesse ciclo ideal (HERNÁNDEZ et al., 2023).

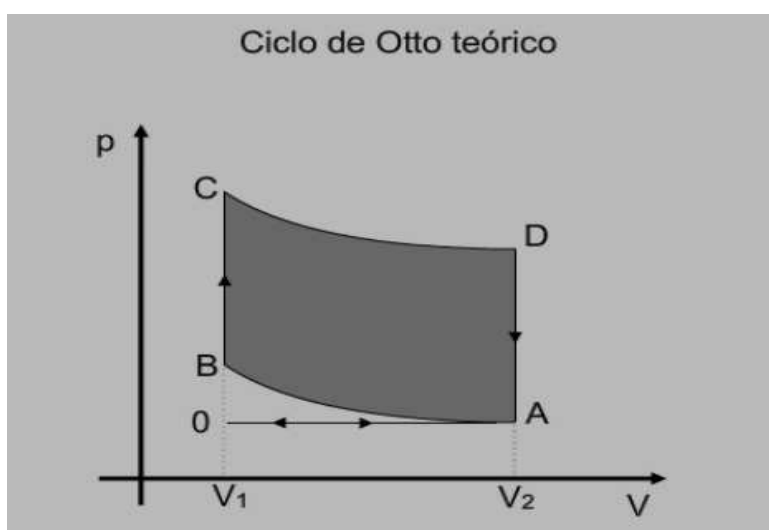
3.2.3 Ciclos Termodinâmicos Clássicos

Motores térmicos operam, fundamentalmente, na base dos ciclos termodinâmicos, ou seja, uma certa corrente de trabalho que passa por algumas transformações físicas e químicas. Os ciclos Otto, Diesel e Rankine, são considerados os pilares de funcionamento de distintos tipos de motores ou máquinas térmicas. Conforme mostram Moran e Shapiro (2006), esses tipos de ciclos colocam os momentos de compressão, aquecimento, expansão e exaustão continuamente do fluido de trabalho, assim, vão desempenhando um papel fundamental na determinação da eficiência de energia do sistema.

3.2.3.1 Ciclo Otto

Iniciado por Nikolaus August Otto, o ciclo Otto é aplicado, predominantemente, nos motores de combustão interna (MCI), por exemplo, nos automóveis. O mesmo tem características de um processo de compressão e expansão que estão ligados com variações de volume e temperatura do fluido de trabalho durante o funcionamento, geralmente numa mistura do ar e com o combustível. A eficiência de energia no ciclo Otto é fundamentada fortemente pela taxa de compressão e no espalhamento do calor no sistema (Ferguson e Kirkpatrick, 2001).

Figura 8 - Diagrama PV do ciclo otto



Fonte: UFRGS (2009).

Representado na figura 8 por um diagrama de pressão x volume (P-V), esse ciclo é composto por dois processos adiabáticos (compressão e expansão) e dois processos isocóricos (adição e rejeição de calor). Na etapa de compressão adiabática (AB), a mistura ar-combustível é comprimida, elevando sua pressão e temperatura sem troca de calor com o meio. Em seguida, ocorre a combustão instantânea em volume constante (BC), resultando em um aumento abrupto de pressão.

A expansão adiabática subsequente (CD) corresponde à fase de trabalho do motor, quando os gases se expandem e realizam trabalho mecânico. Por fim, na rejeição de calor em volume constante (DA), a pressão diminui e o ciclo se reinicia. O gráfico P-V evidencia como a energia térmica é convertida parcialmente em trabalho mecânico e permite a análise

de desempenho e eficiência do ciclo em função da razão de compressão e das propriedades termodinâmicas envolvidas.

A eficiência térmica (η) do ciclo Otto pode ser expressa pela equação:

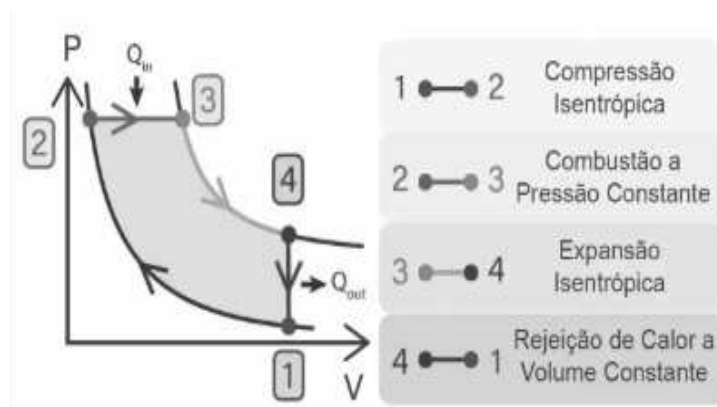
$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (3)$$

onde r é a razão de compressão (relação entre o volume máximo e o volume mínimo do cilindro) e γ é a razão entre os calores específicos do gás (C_p/C_v). Isso mostra que, quanto maior a razão de compressão, maior a eficiência térmica teórica do ciclo. Contudo, em motores reais, há limitações práticas como a ocorrência de detonação e perdas por irreversibilidades, o que reduz a eficiência.

3.2.3.2 Ciclo Diesel

Em relação ao ciclo Diesel, formulado por Rudolf Diesel, um engenheiro alemão, também é usado amplamente em motores de combustão interna, como nos veículos pesados, têm diferença em relação ao ciclo Otto, principalmente no processo de ignição, ou seja, enquanto o ciclo Otto tem uma faísca para inflamar uma mistura de ar-combustível, o ciclo Diesel tem base na compressão do ar para que a temperatura seja necessária para ocasionar uma ignição espontânea do combustível quando injetado. Nessa razão, essa diferença tem resultado em uma melhor eficiência de energia térmica neste ciclo quando é comparado ao Otto, visto que pode alcançar uma maior relação de compressão (Heywood, 1988).

Figura 9 - Diagrama PV do ciclo diesel



Fonte: respondeai.com (2025).

O gráfico pressão versus volume (P-V) do ciclo Diesel representado na figura 9, mostra, de forma idealizada, o comportamento termodinâmico dos motores de ignição por compressão. Esse ciclo é composto por quatro etapas distintas: inicialmente, ocorre uma compressão isentrópica (1-2), onde o ar é comprimido sem troca de calor com o ambiente, resultando em aumento significativo da temperatura e da pressão.

Em seguida, tem-se a adição de calor a pressão constante (2-3), correspondente ao processo de combustão, em que o combustível é injetado e queimado enquanto o volume aumenta, mantendo a pressão constante. A terceira etapa consiste em uma expansão adiabática (3-4), onde os gases quentes se expandem e realizam trabalho sobre o pistão, sem troca de calor. Por fim, ocorre a rejeição de calor a volume constante (4-1), que representa a expulsão dos gases queimados do cilindro, ou seja, uma perda de energia térmica.

A análise desse gráfico permite a compreensão do desempenho ideal do motor Diesel, sendo essencial para o estudo da eficiência e das perdas energéticas em motores reais. Sua principal diferença em relação ao ciclo Otto está no processo de combustão, que ocorre a pressão constante em vez de volume constante. A eficiência térmica do ciclo Diesel é dada pela equação:

$$\eta = \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \left(\frac{\rho^{\gamma}-1}{\gamma(\rho-1)} \right) \quad (4)$$

onde r é a razão de compressão, γ é a razão dos calores específicos (C_p/C_v) e ρ é a razão de corte, que representa o quanto o volume aumenta durante a combustão a pressão constante. Os motores de ciclo Diesel operam com razões de compressão maiores, sua eficiência real tende a ser superior. Isso, somado ao menor consumo específico de combustível, torna os motores Diesel mais eficientes em aplicações industriais e de longa duração.

3.2.3.3 Ciclo Rankine

Além destes, tem-se também o ciclo Rankine de William John Macquorn Rankine, este trata-se de um processo termodinâmico no qual a energia térmica é convertida em trabalho mecânico por meio da circulação de um fluido de trabalho que percorre um ciclo fechado (figura 10) envolvendo mudanças de fase entre os estados de vapor e líquido. Esse tipo de ciclo apresenta relevância razoável em sistemas de conversão de energia, como em usinas termelétricas e reatores nucleares, nos quais o fluido, usualmente água, exerce papel fundamental na determinação da eficiência total do sistema (Çengel e Boles, 2006).

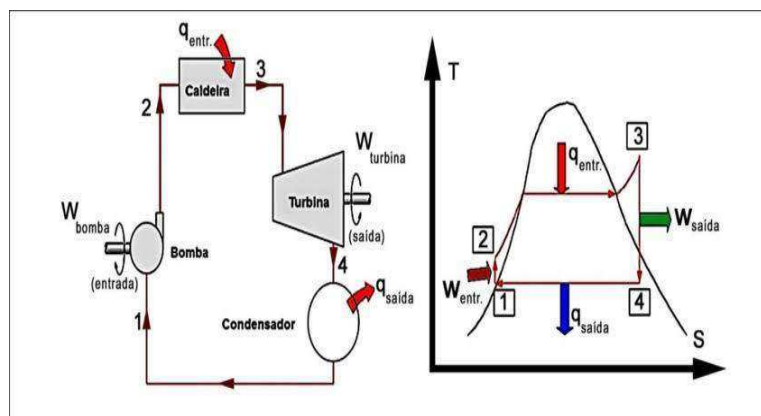
A eficiência térmica do ciclo Rankine é definida como a razão entre o trabalho líquido extraído do ciclo e o calor fornecido à caldeira. A expressão geral eq. 5 baseada nas entalpias dos pontos característicos do ciclo, considera os processos ideais de expansão na turbina e compressão na bomba.

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (5)$$

onde h_1 e h_2 referem-se à entalpia na entrada e saída da turbina, enquanto h_3 e h_4 estão associados ao processo de bombeamento. Nisto, o numerador representa o trabalho líquido (diferença entre o trabalho da turbina e o gasto pela bomba), e o denominador indica o calor total absorvido na caldeira. Em condições reais, o rendimento do ciclo Rankine é afetado por perdas térmicas e irreversibilidades, sendo inferior ao do ciclo de Carnot, mas sua aplicação prática o torna indispensável para a geração de eletricidade.

Historicamente, o ciclo Otto e o ciclo Diesel têm sido os mais comuns em motores térmicos, mas a busca por uma maior, melhor eficiência e um menor impacto ambiental tem levado ao desenvolvimento e adoção de ciclos termodinâmicos mais avançados, como o ciclo Atkinson, Miller e combinados, que oferecem melhorias mais significativas em termos de eficiência térmica.

Figura 10- Apresentação do ciclo Rankine



Fonte: ResearchGate (2025).

3.2.3.4 Ciclo de Brayton

O ciclo de Brayton, proposto por George Brayton, é um dos mais relevantes em relação aos ciclos termodinâmicos para a conversão de energia térmica em mecânica, presente particularmente em turbinas a gás e motores aeronáuticos. A sua estrutura compreende-se em quatro processos fundamentais: a compressão adiabática, adição de calor em pressão constante, uma expansão adiabática e rejeito de calor em pressão constante (Çengel & Boles, 2015).

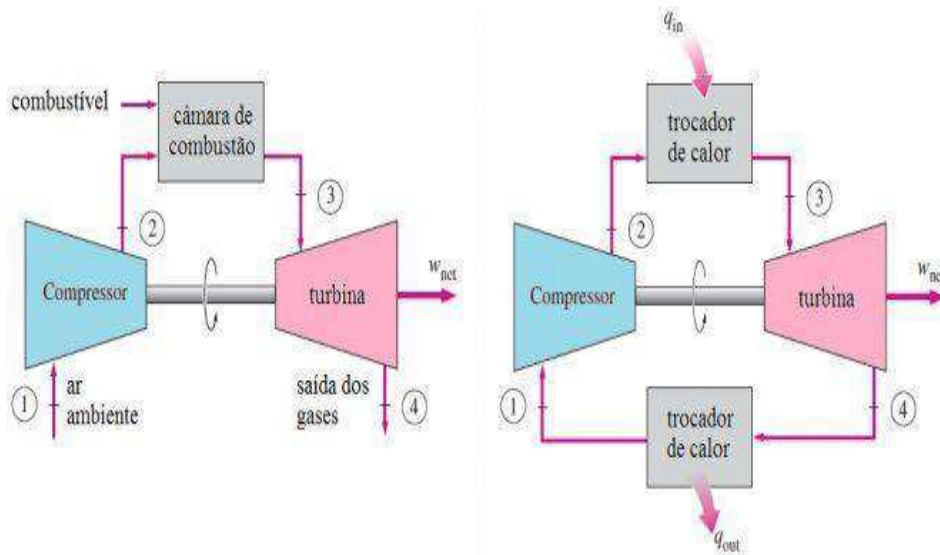
A eficiência de energia térmica nesse tipo de ciclo tem dependência na fração de pressões existentes entre o compressor e câmara de combustão, sendo que aumentos nessa razão resultam em ganhos de desempenho (PARIZZI, 2020). A eficiência térmica do Ciclo Brayton ideal, amplamente utilizado em turbinas a gás, pode ser descrita pela expressão:

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (6)$$

na qual r_c representa a razão de compressão e γ é a razão entre os calores específicos do fluido de trabalho (geralmente o ar). Essa relação expressa na eq. 6 evidencia que a eficiência aumenta com o crescimento da razão de compressão, desde que mantidas as condições ideais, como ausência de perdas por atrito e trocas de calor irreversíveis. No entanto, em sistemas reais, essa eficiência é afetada por diversos fatores, como a temperatura máxima limitada pelos materiais da turbina e as irreversibilidades nos processos de compressão e expansão.

Nas últimas décadas, o ciclo de Brayton teve evoluções consideravelmente eficientes, com destaque nas configurações de regeneração, nos intercoolers e sistemas de recirculação, que tem o foco para a redução de consumo específico de combustível e mais controle das emissões de poluentes (Zhang et al., 2019). O ciclo de combinação “gás-vapor”, que tem integração do ciclo Brayton e o ciclo Rankine, tem uma representação atualmente em ser umas das respostas com mais eficiência na geração de eletricidade, podendo atingir aproximadamente 60% em certas eficiências totais no sistema (Khamis, 2012; CARVALHO, 2021).

Figura 11- Representação ciclo Brayton (aberto/fechado)



Fonte: UFABC (2025).

Conforme mostra a figura 11, o Ciclo Brayton pode ser operado em duas configurações distintas: aberta e fechada. No ciclo aberto, comum em turbinas a gás utilizadas na propulsão de aeronaves, o ar atmosférico é aspirado, comprimido, aquecido na câmara de combustão com injeção de combustível e, após a expansão na turbina, os gases são liberados diretamente no ambiente.

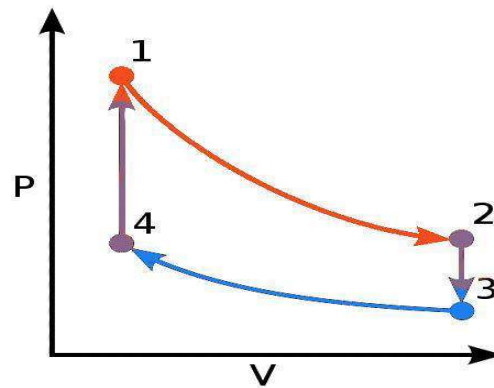
Já no ciclo fechado, geralmente aplicado em sistemas estacionários de geração de energia, o fluido de trabalho circula continuamente dentro de um sistema selado, sendo aquecido por uma fonte externa e resfriado após a expansão, sem troca direta com o meio externo. Em termos de eficiência, o ciclo fechado permite maior controle sobre as condições termodinâmicas, possibilitando o uso de gases diferentes do ar (como hélio ou dióxido de carbono supercrítico), o que pode elevar o rendimento térmico.

3.2.3.5 Ciclo de Stirling

O ciclo de Stirling, inventado por Robert Stirling é, particularmente, um ciclo regenerativo fechado que tem operação mediante um fluido de trabalho gasoso de permanência, o mesmo fica realizando 4 (quatro) processos, 2 (dois) isotérmicos e 2 (dois) isovolumétricos de regeneração (Martínez et al., 2019). Sendo diferente do ciclo de Brayton, esse ciclo destaca-se pela não presença da combustão interna (CI) e pela chance de operação em muitas fontes de calor (MOURA et al., 2017).

Esse ciclo consiste de quatro processos internamente reversíveis em série, conforme mostra a figura 12, que consiste em uma expansão isotérmica (processo 1-2), seguido de um resfriamento a volume constante (processo 2-3), uma compressão isotérmica (processo 3-4) e um aquecimento a volume constante (processo 4-1).

Figura 12- Diagrama Pv (Pressão x Volume) do ciclo Stirling



Fonte: Meio digital (2025).

A sua eficiência teórica tem aproximação na eficiência de Carnot, em especial, quando está associado com regeneradores de alta eficácia. Contudo, na prática, inevitavelmente, limites relacionados com as perdas por fricção, condução térmica e a vazão de fluidos tendem a reduzir o seu desempenho real (Formosa & Despesse, 2010; OLIVEIRA, 2017). A expressão que descreve sua eficiência ideal é dada por:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (7)$$

onde T_f e T_q representam, respectivamente, as temperaturas das fontes fria e quente. Essa equação mostra que a eficiência do ciclo depende apenas da razão entre essas temperaturas, o que caracteriza um comportamento termodinamicamente ideal. Entretanto, na prática, fatores como perdas térmicas, limitações na regeneração e imperfeições nos processos isotérmicos reduzem sua eficiência real.

Ademais, mediante os avanços na modelagem termodinâmica dos motores Stirling, com a utilização de métodos com base na termodinâmica de tempo finito (FTT), existe uma maior permissão na compreensão das irreversibilidades integradas ao ciclo, contribuindo assim para o desenvolvimento de eficientes e, economicamente viáveis, projetos de sistemas (Chen et al., 2017).

3.2.4 Ciclos Termodinâmicos Modernos

Os ciclos Atkinson e Miller são variantes do ciclo Otto, estes foram desenvolvidos para melhorar a eficiência através de uma expansão mais longa em relação à compressão, pois permite uma maior extração de energia dos gases de escape.

3.2.4.1 O Ciclo Atkinson

No ciclo Atkinson, criado por James Atkinson, um engenheiro britânico, a relação de expansão fica maior do que a de compressão, com isso, o processo de rejeição de calor pode ocorrer com pressão constante. A relação alta de expansão vai permitir que seja adquirido mais trabalho, logo, estará havendo assim uma maior eficiência em relação ao ciclo Otto. Ora, quando atinge isso, permite que a válvula de exaustão permaneça aberta por mais tempo no final do curso de escape.

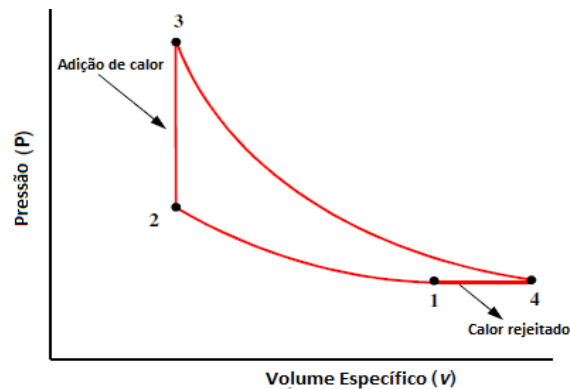
Essa modificação eleva a eficiência térmica, tornando-o particularmente adequado para motores híbridos e veículos com foco em economia de combustível, já que vários fabricantes estão aplicando este conceito em motores atuais (Johnson & Matthews, 2021).

A eficiência térmica ideal do ciclo Atkinson, assim como a do ciclo Otto, pode ser expressa por:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \quad (8)$$

onde r_c é a razão de compressão e γ é a razão dos calores específicos (C_p/C_v). No entanto, no ciclo Atkinson, a razão de expansão é maior que a de compressão, o que permite uma eficiência real superior, especialmente em regimes de baixa carga. Essa arquitetura tem sido amplamente adotada em veículos híbridos modernos, nos quais a eficiência do motor térmico é maximizada durante os períodos de maior demanda energética.

Figura 13 - Diagramas P-v do ciclo Atkinson.



Fonte: Crosby e Akbare (2014).

O diagrama, conforme mostra a figura 13, vai descrever uma compressão isentrópica entre 1-2, em seguida acontece uma combustão a volume constante (2-3), onde então ocorre uma expansão isentrópica entre 3-4. O fim do ciclo acontece com uma rejeição de calor a pressão constante, voltando às condições iniciais do processo. Observa-se que a fase de expansão dos gases vai superar a fase de compressão, isso indica um aproveitamento melhor e mais eficiente da energia liberada durante a combustão.

Essa diferença no ciclo se tem principalmente por meio da estratégia de manter a válvula de admissão aberta por mais tempo, reduzindo assim a compressão efetiva. No gráfico, isso vai refletir em uma curva de compressão e expansão, respectivamente, mais curta e longa. Resultando assim, em uma configuração que permite um maior rendimento térmico com menor consumo de combustível e minimização de emissões de poluentes.

3.2.4.2 O Ciclo Miller

O ciclo Miller, desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Ralph Miller em 1947 e chamado também por “motor de cinco tempos”, é usado como modelo para motores híbridos utilizados no Ford Escapade e no Toyota Prius (Borgnakke & Sonntag, 2013). A sua fase de expansão é mais prolongada do que a fase de compressão, permitindo assim uma sobre-expansão dos gases queimados que seriam perdidos pelo escape (SOUZA; PAIVA, 2017).

Esse ciclo consiste em ser uma adaptação termodinâmica do ciclo Otto, projetada para aprimorar a eficiência dos motores de combustão interna por meio da alteração do momento

de fechamento da válvula de admissão. Essa modificação resulta na diminuição da taxa de compressão efetiva, mantendo inalterada a taxa de expansão, o que possibilita um aproveitamento mais eficiente da energia térmica liberada durante o processo de combustão.

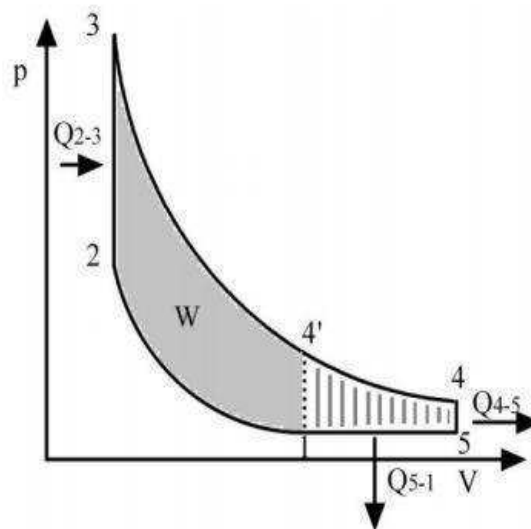
Por sua vez, consegue seu aumento de eficiência utilizando um processo onde a compressão é reduzida por meio do fechamento antecipado da válvula de admissão. Embora isso possa diminuir a sua potência máxima, vai possibilitar uma combustão mais eficiente e que gera menos calor residual e menor tensão térmica no motor.

Assim como nos demais ciclos ideais, a eficiência do Ciclo Miller pode ser estimada pela equação:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \quad (9)$$

onde r_c representa a razão de compressão efetiva e γ a razão dos calores específicos do fluido de trabalho. Todavia, no Ciclo Miller existe o uso de válvulas com comando variável ou sistemas de superalimentação que permite ajustar os parâmetros de admissão e compressão, obtendo uma razão de expansão maior que a compressão, o que resulta em melhor desempenho térmico real, especialmente em cargas parciais. Esta abordagem é frequentemente usada em motores turboalimentados, onde é ainda mais eficaz (Lee & Harris, 2022).

Figura 14 - ciclo teórico de Miller



Fonte: Pereira (2013).

O gráfico P–V (pressão versus volume) do Ciclo Miller, apresentado na fig. 14 apresenta semelhanças com o ciclo Otto, mas com diferenças na fase de compressão. A principal característica visual do ciclo Miller é uma compressão mais curta, resultante do fechamento antecipado ou retardado da válvula de admissão.

Isso faz com que a compressão efetiva seja menor, enquanto a expansão permanece completa, ou seja, o volume da câmara no final da expansão é igual ao volume máximo inicial, mantendo uma razão de expansão elevada. No gráfico, isso se traduz em uma curva de compressão que se inicia após o ponto de admissão, com menor área comparada à do ciclo Otto.

Em síntese, cada motor térmico, juntamente com o ciclo termodinâmico associado, apresenta características particulares que o tornam mais adequado para determinadas aplicações nos setores industrial e comercial. A seleção do motor e do tipo de ciclo apropriado está fortemente relacionada a fatores como eficiência energética desejada, viabilidade econômica e a natureza da fonte de energia disponível.

3.2.5 As Irreversibilidades (Perdas de Energia)

A compreensão das irreversibilidades em ciclos termodinâmicos é um passo fundamental na melhoria de desempenho dos motores térmicos, uma vez que essas irreversibilidades são diretamente responsáveis por perdas de energia e pela limitação da máxima eficiência teórica que um sistema pode alcançar. Tais perdas estão associadas, em grande parte, a processos irreversíveis presentes nos ciclos termodinâmicos, como dissipações térmicas para o ambiente, atrito interno entre componentes, limitações na transferência de calor e imperfeições na conversão de energia química em trabalho mecânico (Lee & Harris, 2022).

Na prática, todas as operações de máquinas térmicas, sejam os motores de combustão interna, externa e as turbinas a gás, são afetadas por irreversibilidades que afastam o seu melhor desenvolvimento energético dos modelos ideais previstos pela segunda lei da termodinâmica. A identificação precisa e a quantificação dessas fontes de ineficiência, à luz da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica, permitem que engenheiros proponham intervenções que reduzam a geração de entropia e aumentem a fração de energia útil convertida em trabalho.

Ao minimizar os desvios em relação ao comportamento idealizado dos ciclos, é possível aproximar a operação real dos motores de seus limites teóricos de eficiência. Nos motores térmicos convencionais, uma quantidade significativa de perda energética ocorre devido à dissipação de calor nos componentes do motor.

As irreversibilidades têm o seu surgimento em várias formas dentro de um sistema termodinâmico. Primeiro, existem as perdas por fricção, que emergem do atrito entre as partes de movimento do motor. Esse tipo de perda é predominante em motores de combustão interna, onde os componentes, como pistões e válvulas, estão em constante movimento.

Essa irreversibilidade não apenas espalha a energia útil em forma de calor, mas também demanda energia adicional para superar as resistências criadas, resultando assim em um ciclo termodinâmico não eficiente (Johnson & Walters, 2022). As perdas térmicas configuram-se como um dos principais fatores limitantes da eficiência de motores térmicos, representando a fração da energia interna que, embora gerada no processo de combustão, não é convertida em trabalho útil.

A transferência de calor entre partes do motor e o seu entorno é outro ponto crítico onde existe a irreversibilidade. As trocas de calor que não ocorrem isentropicamente, em outras palavras, quando o sistema troca calor com o exterior sem manter a entropia constante, são irreversíveis e levam a perdas de energia. Em um motor Diesel, por exemplo, as variações de temperatura no momento dos processos de compressão e expansão chegam a trocas de calor que aumentam a entropia total do sistema, minimizando a quantidade de energia aproveitável para trabalho útil (Smith, 2022).

Os processos de combustão dentro da câmara de combustão de um motor representam uma área significativa de irreversibilidades. Nas operações reais, o tempo de combustão não é instantâneo e ocorre junto com um gradiente de pressão e temperatura que contribui para aumento da entropia, ou seja, um indicador de irreversibilidades. Isso tem resultado em uma menor quantidade de energia térmica disponível que está sendo convertida em energia mecânica, o que compromete diretamente a eficiência do motor (Ricardo & Santos, 2023). Esses processos, analisados sob a ótica da Termodinâmica de Tempo Finito e da Segunda Lei da Termodinâmica, estabelecem uma barreira teórica ao desempenho ideal dos motores térmicos.

Conforme destacado por Atkins e De Paula (2006), essas irreversibilidades são inevitáveis em qualquer processo real e devem ser quantificadas e minimizadas para que se atinja uma eficiência próxima à dos limites teóricos estabelecidos pelos ciclos de Carnot. Os mecanismos de perdas de energia em motores térmicos são diversos e interdependentes,

envolvendo desde dissipações térmicas e mecânicas até irreversibilidades inerentes aos processos de conversão energética. As irreversibilidades também ocorrem por meio de uma mistura incompleta ou inadequada de combustível e ar no sistema de combustão interna, onde a distribuição desigual do combustível pode ter resultado em combustões mais fracas e a liberação de gases não queimados que carregam energia não utilizada. Isso pode ser otimizado através de sistemas melhores de injeção de combustível, que vão regular os padrões de pulverização e combustão para diminuir perdas (Garcia et al., 2023).

Em relação aos ciclos de refrigeração e ciclos Rankine, irreversibilidades também estão ligadas às diferenças de temperatura entre as fontes quente e fria que acionam o ciclo. Quando essas diferenças não são otimizadas, o ciclo não pode atingir sua eficiência teórica máxima. Em instalações de energia, como usinas de ciclo combinado, um controle inadequado da adição e extração de calor leva a desempenhos abaixo do esperado e, com isso, a perdas de energia (Munro, 2021). Abordagens para mitigar irreversibilidades estão na vanguarda da pesquisa em energia térmica. Uma asseguarção de superfícies de contato suaves e no desenvolvimento de revestimentos que reduz o atrito, implementando tecnologias como esguichos de combustão avançados para misturar combustível de forma mais uniforme, e melhorando os sistemas de transferência de calor, são estratégias comuns adotadas para enfrentar essas dificuldades.

Do ponto de vista termodinâmico, essas perdas aumentam a entropia do sistema e desviam o motor de sua eficiência ideal. A magnitude dessas perdas está relacionada à rugosidade superficial, velocidade relativa entre os componentes e viscosidade dos lubrificantes utilizados. Andrade e Santos (2018) destacam que avanços no uso de revestimentos de baixo atrito, lubrificantes sintéticos de alta performance e materiais compósitos têm contribuído para a mitigação desses efeitos, elevando o rendimento global dos motores de combustão interna. Com o implemento de estratégias de otimização tecnológica e sistemas de controle inteligente, as perdas podem ser mitigadas, desenvolvendo sistemas mais eficientes e reduzindo o consumo dos combustíveis fósseis e emissão de poluentes, alinhando assim o desenvolvimento dos motores térmicos com metas globais de sustentabilidade e eficiência energética (Nelson & Lee, 2023). Os mecanismos de perdas de energia em motores térmicos são diversos e interdependentes, envolvendo desde dissipações térmicas e mecânicas até irreversibilidades inerentes aos processos de conversão energética. A compreensão aprofundada desses processos exige uma análise integrada dos ciclos termodinâmicos reais, considerando limitações impostas pela Segunda Lei da Termodinâmica e pelas condições operacionais não ideais (Lee & Harris, 2022).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho fundamenta-se em um estudo teórico e exploratório, com um objetivo de analisar estudos e avanços recentes da termodinâmica com aplicação aos motores térmicos, na otimização, eficiência e minimização das perdas energéticas nos mesmos. Com isso, adotou-se uma abordagem qualitativa, com fundamentos em uma revisão bibliográfica sistemática, o que permitiu uma coleta, análise e uma concepção crítica das informações extraídas de fontes científicas com confiabilidade.

De início, teve-se a realização de uma busca criteriosa nas bases de dados acadêmicas confiáveis, como Scopus, ScienceDirect, Web of Science e Google Acadêmico, utilizando algumas palavras-chave com relação ao tema, como “motores térmicos”, “irreversibilidades”, “termodinâmica aplicada”, “otimização de motores”, “eficiência térmica”, “perdas energéticas”, “ciclos termodinâmicos” e “termodinâmica de tempo finito”. Existiu um recorte temporal que privilegiou os estudos e pesquisas da última década, no intuito de garantir uma relevância e mais modernidade em relação aos dados analisados.

Sobre a seleção dos materiais, foram considerados artigos científicos, livros técnicos, dissertações e teses, dando prioridade para trabalhos com abordagem nos fundamentos teóricos da termodinâmica, assim como também em seus modelos de aplicação prática e avanços nos motores térmicos. Esta análise de conteúdos, teve uma busca em identificar as principais contribuições, os desafios e tendências nesse campo de pesquisa, dando enfoque, em especial, a aspectos de operação relacionados às leis da termodinâmica, as irreversibilidades, princípios dos ciclos reais e métodos de otimização de eficiência de energia.

Foram escolhidos trabalhos com publicação nos idiomas inglês, espanhol e português, pois considerou-se que essas línguas iriam abranger uma elevada produção científica de relevância com permissão de acesso em diferentes concepções nacionais e internacionais. No decorrer do desenvolvimento da pesquisa, teve-se o enfrentamento de alguns desafios. Um deles se deu na necessidade da tradução de artigos e livros em idiomas estrangeiros, especialmente em inglês, o que originou um certo esforço adicional na pesquisa, no objetivo de garantir uma melhor precisão e confiabilidade das informações técnicas e científicas analisadas.

Outrossim, em decorrência da natureza do trabalho, que tem o envolvimento de uma análise teórica sistemática e com abrangência da literatura, o desenvolvimento do mesmo poderia originar um corpo de texto extenso e detalhado. Conforme explica Lakatos (2003),

uma revisão bibliográfica sistemática é de caráter essencial para a melhor construção do conhecimento científico, pois não dá apenas a permissão de identificar as principais contribuições da área, como também uma abordagem clara dos problemas e das lacunas existentes, fortalecendo assim a fundamentação teórica da pesquisa e permitindo assim uma concepção mais integrada dos avanços científicos e tecnológicos mais relevantes.

Outro desafio enfrentado foi em relação à diversidade de metodologias e terminologias encontradas em diferentes estudos, com isso, exigiu-se um esforço para a sistematização e na adaptação de conceitos na composição de uma visão íntegra e com coerência para com o tema. A complexidade científica de modelos termodinâmicos e as condições experimentais variadas descritas em alguns artigos demandaram-se também para com uma análise complexa no intuito de encontrar os pontos de vista mais pertinentes para os objetivos do presente trabalho acadêmico.

Em conclusão, este método escolhido não permitiu somente um levantamento mais abrangente do conhecimento científico da atualidade, como também uma construção de um ponto de vista mais integrado nos avanços científicos e tecnológicos com relação à termodinâmica dos motores térmicos, com contribuição para a compreensão dos resultados possíveis e as limitações que existem durante a busca por uma melhor eficiência de energia térmica e, um ambiente ao redor, mais sustentável.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTUDOS E AVANÇOS DA TERMODINÂMICA PARA OS MOTORES TÉRMICOS RECENTES

5.1.1 Estratégias para Redução de Perdas de Energia

A diminuição das irreversibilidades em motores térmicos constitui um campo fundamental de investigação, cujo objetivo é melhorar e elevar a eficiência energética por meio da mitigação das perdas resultantes de processos dissipativos e não ideais. Entre essas irreversibilidades, tem-se o atrito, a dissipação térmica e as limitações inerentes às transformações termodinâmicas reais. Embora, na prática, nenhuma máquina térmica alcance uma operação completamente reversível, os avanços contínuos nas estratégias de projeto e nos sistemas de controle têm contribuído de maneira significativa para a redução desses efeitos indesejáveis (KAUR; JOHAL, 2024).

A otimização dos ciclos termodinâmicos utilizados na operação de motores térmicos representa uma das principais estratégias para mitigar as irreversibilidades. Por meio do ajuste preciso de variáveis operacionais, como pressões e temperaturas, têm-se desenvolvido configurações de ciclo que se aproximam das condições ideais. Um exemplo notável é a modificação do tradicional ciclo Otto, dando origem ao ciclo Atkinson, que promove um equilíbrio entre a eficiência no consumo de combustível e a entrega de potência, ajustando os tempos de compressão e expansão e, conseqüentemente, reduzindo perdas associadas à combustão incompleta (STONE, 2012).

A redução das perdas energéticas em motores térmicos configura-se como um campo essencial para a pesquisa e o desenvolvimento, com grande potencial para elevar a eficiência energética e atenuar os impactos ambientais associados às operações mecânicas. Esses esforços visam não apenas aprimorar o desempenho dos sistemas, mas também atender à crescente necessidade por soluções tecnológicas que conciliam sustentabilidade e viabilidade econômica. Para tal, diversas estratégias vêm sendo concebidas e aplicadas, abrangendo desde avanços na engenharia de materiais até inovações nos próprios processos termodinâmicos (RIAZ et al, 2023).

Nesse contexto, estratégias como a recirculação de gases de escape (EGR), combustão em múltiplos estágios e controle eletrônico do tempo de ignição têm sido aplicadas para modular a taxa de liberação de calor e reduzir gradientes térmicos abruptos, diminuindo a irreversibilidade do sistema. Tais abordagens, quando aliadas a sensores de alta

precisão e algoritmos de controle adaptativo, permitem operar os motores em regimes mais próximos dos limites impostos pelo ciclo de Carnot, promovendo uma maior racionalização do uso energético e menor impacto ambiental (MORAN; SHAPIRO, 2006).

A operação de motores térmicos envolve, de forma inerente, desafios significativos relacionados à dissipação de calor. Em resposta a essa limitação, pesquisas contemporâneas têm direcionado esforços ao desenvolvimento de tecnologias que aprimoram o isolamento térmico, com o objetivo de maximizar a retenção de calor e, consequentemente, aumentar sua conversão em trabalho mecânico. Entre essas inovações, destacam-se os revestimentos cerâmicos avançados, que vêm sendo amplamente utilizados em peças críticas dos motores, promovendo uma maior eficiência na retenção térmica (GOES et al., 2023).

A adoção de tecnologias avançadas de materiais configura-se como uma estratégia promissora para a mitigação das perdas energéticas em motores térmicos, ao possibilitar a redução do atrito e a melhoria da condução térmica — aspectos fundamentais para a elevação da eficiência energética. A aplicação de ligas metálicas de alto desempenho, bem como de revestimentos cerâmicos, contribui de maneira significativa para minimizar o desgaste e as perdas por atrito entre os componentes do motor. Além disso, pesquisas recentes indicam que a incorporação de nanomateriais em lubrificantes potencializa ainda mais a redução do atrito, promovendo ganhos expressivos em durabilidade e eficiência operacional (LEE; KIM, 2022).

Além disso, tecnologias de recuperação de calor, como turbocompressores e *intercoolers*, representam soluções eficazes para reaproveitar a energia térmica residual gerada pelos motores. A energia contida nos gases de escape em alta temperatura pode ser convertida em trabalho útil, promovendo um aumento significativo na eficiência do ciclo do motor. A integração de ciclos Rankine com esses sistemas de recuperação tem demonstrado elevado potencial para transformar o calor residual em energia mecânica aproveitável. A adoção desses sistemas não só melhora a eficiência do consumo de combustível, como também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às exigências ambientais atuais (JOHNSON; ROBERTSON, 2023).

O emprego de sistemas avançados de controle eletrônico constitui um elemento essencial nas atuais estratégias de otimização da eficiência energética dos motores térmicos. O desenvolvimento de unidades de gerenciamento que integram sensores de alta precisão e algoritmos preditivos têm revolucionado a operação desses motores em tempo real. Tais sistemas realizam ajustes dinâmicos em diversos parâmetros operacionais — como a relação ar-combustível, o tempo de ignição e a pressão da turboalimentação —, assegurando uma performance otimizada em distintas condições de funcionamento (GARCIA et al., 2023).

Nos últimos anos, a automação e os sistemas de *feedback* tornaram-se fundamentais para a promoção de melhorias substanciais no desempenho dos motores térmicos.

O avanço de tecnologias baseadas em inteligência artificial e aprendizado de máquina possibilita que os sistemas de controle ajustem, em tempo real, a operação do motor conforme as condições ambientais e as exigências de carga, minimizando desperdícios e elevando a eficiência energética global. Ademais, a aplicação de análises preditivas e técnicas baseadas em big data permite antecipar falhas e otimizar os procedimentos de manutenção, contribuindo para a redução das perdas de energia decorrentes do desgaste e da degradação dos componentes do motor (NELSON; THOMPSON, 2023).

Para além do aperfeiçoamento dos componentes convencionais, o desenvolvimento de tecnologias adaptativas tem promovido uma revolução no desempenho dinâmico dos motores térmicos. Dispositivos como válvulas de tempo variável (VVT) e turbocompressores de geometria variável (VGT) são capazes de ajustar, em tempo real, parâmetros críticos do ciclo termodinâmico — como tempo de admissão, pressão de sobrealimentação e razão de compressão efetiva — em função da carga e da rotação do motor.

Essa capacidade de autorregulação contribui diretamente para a maximização da eficiência térmica em regimes transientes, reduzindo perdas irreversíveis por dissipação de calor e atrito. De acordo com Franco et al. (2020), a incorporação dessas tecnologias permite um controle mais preciso do equilíbrio entre potência, consumo específico de combustível e emissões, adequando o funcionamento do motor às exigências operacionais de maneira energeticamente eficiente.

No âmbito da engenharia de materiais aplicados à termodinâmica, a incorporação de elementos estruturais com elevada resistência térmica e mecânica — como cerâmicas avançadas e ligas metálicas de alto desempenho — tem sido fundamental na evolução dos motores térmicos. Esses materiais permitem que o sistema opere sob temperaturas mais elevadas, o que, segundo os princípios da segunda lei da termodinâmica, possibilita o aumento da eficiência térmica ao elevar a razão entre as temperaturas do reservatório quente e frio. Ao aproximar as condições operacionais dos limites estipulados pelo ciclo de Carnot, esses avanços materiais viabilizam um desempenho mais próximo do ideal teórico, reduzindo perdas energéticas por condução e dissipação (MÜLLER; FREITAS, 2020).

Adicionalmente, observa-se um foco crescente na incorporação de sistemas de recuperação de energia térmica em motores, com destaque para os Ciclos Orgânicos de Rankine (ORC), que são projetados para converter o calor residual — normalmente descartado no ambiente — em trabalho mecânico adicional. Esses sistemas operam com

fluidos de trabalho de baixo ponto de ebulição, possibilitando a conversão eficiente de energia mesmo em temperaturas moderadas. Sob a visão da segunda lei da termodinâmica, tal abordagem reduz a entropia gerada no processo ao recuperar energia anteriormente irreversível, o que se traduz em ganhos na eficiência energética global. Conforme analisado por Oliveira e Mendes (2017), a implementação de ciclos ORC em conjunto com motores de combustão interna não apenas eleva a eficiência térmica total, mas também promove um uso mais racional dos recursos energéticos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a redução do consumo de combustíveis fósseis.

A otimização dos ciclos termodinâmicos aplicados aos motores constitui outro aspecto fundamental na busca por maior eficiência energética. A introdução de ciclos alternativos, como os ciclos Atkinson e Miller, visa a redução das irreversibilidades inerentes ao processo, promovendo ganhos significativos na eficiência. Essas modificações são concebidas para aumentar a relação de expansão, permitindo a extração de uma quantidade superior de trabalho a partir da mesma quantidade de calor fornecido ao sistema, resultando, assim, em uma elevação da eficiência térmica (YAMAMOTO, 2022).

A adoção de combustíveis alternativos e misturas de biocombustíveis configura-se como uma estratégia eficaz para a mitigação das perdas energéticas em motores térmicos. Esses combustíveis possibilitam processos de combustão mais limpos e eficientes, reduzindo a dissipação de energia sob a forma de poluentes e calor residual. Paralelamente, as tecnologias de motorização híbrida, que combinam motores de combustão interna com sistemas elétricos, potencializam a eficiência global ao explorar de maneira otimizada os pontos de máxima eficiência operacional, além de recuperar energia durante processos como a frenagem regenerativa (SMITH; JORDAN, 2022).

Na vanguarda das inovações energéticas, a pesquisa sobre células de combustível a hidrogênio destaca-se como uma alternativa promissora para uma transformação radical na eficiência dos sistemas de propulsão. Essas células realizam a conversão direta do hidrogênio em eletricidade com elevada eficiência, oferecendo uma solução sustentável que elimina grande parte das limitações associadas às perdas inerentes aos motores térmicos convencionais (ANDERSON; MATTHEWS, 2023).

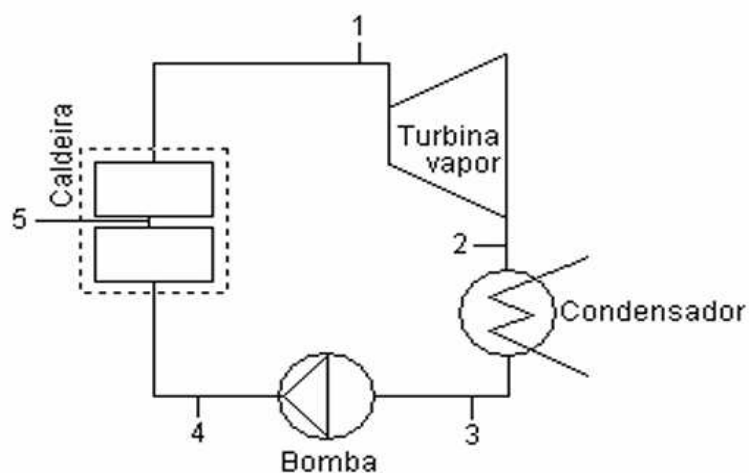
Em síntese, a adoção e o contínuo aprimoramento de estratégias voltadas à mitigação das perdas energéticas constituem elementos indispensáveis para o futuro dos motores térmicos. Tais inovações não apenas elevam os níveis de eficiência e sustentabilidade, mas também promovem um realinhamento da engenharia térmica aos compromissos globais de redução das emissões de carbono e proteção ambiental. Através de um esforço contínuo em

prol da inovação tecnológica e do aprimoramento da eficiência energética, a próxima geração de motores térmicos tende a ser mais competitiva, confiável e ambientalmente responsável, em consonância com as rigorosas normas que regem um cenário global cada vez mais atento às questões ambientais (BROWN; LEE, 2023).

5.1.2 Aplicação do Ciclo Rankine Orgânico

O Ciclo Rankine Orgânico (CRO), ou (*Organic Rankine Cycle-ORC*), pode representar um ponto evolutivo e significativo em relação aos motores térmicos, em especial, no que se refere a recuperação de calor residual e a geração de energia em ambientes com baixas e médias temperaturas (JIMÉNEZ-GARCÍA, 2023). Conforme a figura 15, o CRO fica sendo igual ao modelo esquemático do ciclo Rankine convencional e diferente na utilização do fluido de trabalho, o CRO faz operação junto com substâncias orgânicas, como os hidrocarbonetos ou fluidos refrigerantes, pois possuem os pontos de ebulição em temperaturas mais baixas. Devido a essa característica, permite-se a conversão de fontes térmicas com baixa qualidade de energia mecânica e, adiante, elétrica, tendo a promoção em uma aplicação prática com mais eficiência dos princípios da termodinâmica.

Figura 15 - Esquema CRO



Fonte: Scatolini 2012.

Na visão da Termodinâmica, o CRO tem fundamento na Segunda Lei, quando se explora a irreversibilidade particular aos processos reais com o objetivo de maximizar a eficiência exergética nos sistemas térmicos. Pesquisas recentemente realizadas, evidenciam

que o desempenho deste ciclo tem sido influenciado pela seleção do fluido de trabalho, pelas condições de sua operação e pela eficiência concebida pelos componentes, em exemplo, a turbina e o mecanismo da troca de calor (Lecompte et al., 2017; Quoilin et al., 2021). Nesta razão, o melhoramento desses parâmetros, algumas vezes realizado através de métodos da FTT, tem dado a permissão de ampliar o resultado competitivo do ciclo devido às outras tecnologias de transformação de energia.

Além disso, com a integração do CRO setor de sistemas automotivos e outras indústrias, deixa-se a evidência do seu potencial no compromisso da sustentabilidade e eficiência de energia. Por exemplo, os motores térmicos de combustão interna podem ser unidos com os sistemas do ORC para a recuperação de parte do calor que é rejeitado, elevando a eficiência global e colocando reduções nas emissões de gases (Liu et al., 2019).

Na literatura recente, existe um reforço de que o avanço tecnológico no desenvolvimento de fluidos orgânicos novos e em uma modelagem termodinâmica pode contribuir para a expansão de aplicações por meio do CRO. Os estudos de Zhang et al. (2020) mostram que a utilização de misturas nos fluidos, ao contrário de substâncias consideradas puras, pode melhorar o desempenho térmico e diminuir os riscos ambientais ligados ao ciclo. Em paralelo, com a aplicação de métodos de otimização multiobjetivo existe a consolidação de ser uma prática em essência para balancear a eficiência energética, os custos e o impacto no meio ambiente (Colonna et al., 2015).

Portanto, o Ciclo Rankine Orgânico (CRO) surge no meio termodinâmico sendo um dos meios mais promissores para a conversão de calor em trabalho mais eficiente, especialmente nos contextos onde tem-se as fronteiras termodinâmicas dos ciclos de tradição que tem inviabilizado a recuperação de energia. Com a sua aplicação nos motores térmicos, não se representa apenas um avanço técnico, como também um acordo com a sustentabilidade e com a utilização dos recursos energéticos.

5.1.3 Materiais Avançados

De acordo com Zhang et al. (2021), o progresso no uso de materiais termicamente e mecanicamente resistentes tem sido um fator crucial para o aprimoramento do desempenho dos motores térmicos na última década, especialmente em aplicações que exigem alta performance energética. A escolha de materiais que apresentem elevada condutividade térmica (k), baixa densidade e alta resistência mecânica possibilita não apenas uma dissipação térmica mais eficaz, mas também garante a integridade estrutural dos componentes submetidos a intensos gradientes térmicos.

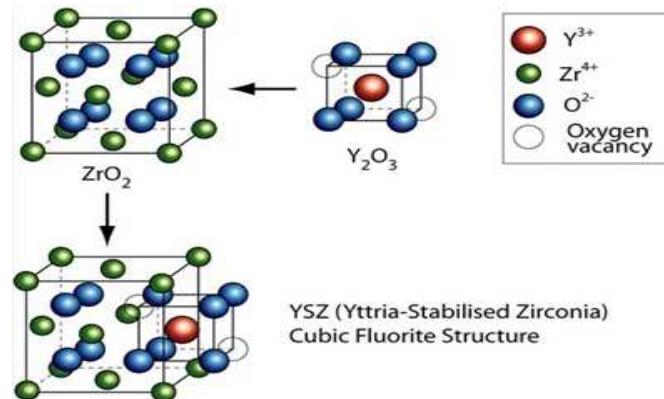
Essas propriedades são essenciais para minimizar perdas de energia por condução e radiação indesejada, conforme descrito pela Lei de Fourier que rege o fluxo de calor:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

onde k é a condutividade térmica do material, uma propriedade física que indica a capacidade de conduzir calor, A é a área da seção transversal e dx/dT representa a variação da temperatura em relação à posição espacial. Além disso, a eficiência térmica dos motores é diretamente afetada pela capacidade dos materiais em suportar temperaturas elevadas, uma vez que isso permite operar com maiores, aproximando-se do rendimento máximo descrito pela eficiência de Carnot. Dessa forma, o desenvolvimento e aplicação de novos materiais não apenas prolongam a vida útil dos motores, mas também contribuem significativamente para o aumento da eficiência termodinâmica e para a sustentabilidade energética dos sistemas térmicos modernos (Çengel & Boles, 2006).

Entre os materiais emergentes com aplicação estratégica em sistemas térmicos, destacam-se as cerâmicas avançadas, cuja estrutura microcristalina confere elevada resistência térmica, mecânica e à corrosão. Um exemplo notável é a zircônia estabilizada com ítria (YSZ), sua estrutura molecular é apresentada na fig. 16, a mesma apresenta baixa condutividade térmica e alta resistência a choques térmicos, características ideais para aplicações em componentes críticos como câmaras de combustão, bicos injetores e válvulas. O uso desses materiais permite a operação do motor em regimes térmicos mais elevados sem comprometer a integridade estrutural, o que, segundo os princípios da Termodinâmica, contribui diretamente para o aumento da eficiência térmica (η) do ciclo, conforme expressa a equação de Carnot (KUMAR et al., 2022).

Figura 16- Representação molecular da YSZ



Fonte: precise ceramic 2024.

Ao reduzir as perdas de calor por condução nos componentes de fronteira térmica, as cerâmicas atuam como barreiras isolantes, elevando o gradiente térmico interno e facilitando uma transferência de energia mais eficiente para o fluido de trabalho. Conforme Fernandes (2019), a aplicação de cerâmicas como a YSZ em motores térmicos configura uma solução técnica promissora para alcançar maiores rendimentos, minimizar o desgaste térmico e otimizar a combustão em condições de altas temperaturas.

De acordo com Wilson et al. (2024), além dos materiais cerâmicos, as ligas metálicas de alto desempenho, especialmente aquelas à base de titânio (Ti) e níquel (Ni), têm sido fundamentais na otimização dos sistemas termomecânicos. As ligas de titânio são amplamente valorizadas por sua elevada relação resistência-peso e estabilidade térmica, sendo empregadas em componentes críticos como eixos rotativos, turbocompressores e rotores. Nessas aplicações, a combinação de baixo módulo de elasticidade, resistência à fluência térmica e baixa densidade favorece a melhoria da relação potência-massa dos motores.

Termodinamicamente, a utilização dessas ligas possibilita a operação em condições de elevada temperatura e altas rotações, reduzindo perdas por inércia e otimizando a conversão da energia fornecida ao sistema. Como consequência, observa-se um aumento da eficiência térmica do ciclo (η) e uma diminuição do consumo específico de combustível. Carvalho et al. (2020) demonstram que a substituição de materiais convencionais por ligas avançadas resulta em melhorias significativas no desempenho global dos motores,

promovendo a redução da geração de entropia e contribuindo para a evolução de sistemas térmicos mais eficientes e sustentáveis.

A aplicação da nanotecnologia na engenharia de motores térmicos têm emergido como um vetor significativo de inovação, particularmente no que se refere à redução das perdas por atrito e ao aumento da eficiência energética. Nano aditivos, como o naftenato de alumínio e o enxofre ativo, incorporados aos lubrificantes aplicados em superfícies de contato dinâmico atuam na escala atômica para diminuir o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, o que resulta em menores perdas irreversíveis de energia mecânica — representadas pelo aumento da entropia no sistema, Conforme destacado por Zhang et al. (2022).

O progresso na pesquisa de materiais avançados representa um vetor essencial para a evolução dos motores térmicos, sobretudo diante das exigências impostas por operações em altas temperaturas e pressões. Do ponto de vista físico, o uso de materiais com propriedades termodinâmicas superiores — como elevada temperatura de fusão, baixa condutividade térmica em regiões isolantes, alta condutividade em trocadores de calor, e coeficientes de expansão térmica controlados — é fundamental para mitigar irreversibilidades relacionadas à transferência de calor e à dissipação de energia mecânica por atrito (Gomes et al., 2021).

Além disso, de acordo com Silva e Andrade (2020), esses materiais possibilitam operar motores mais próximos do limite teórico de eficiência imposto pelo ciclo de Carnot, já que toleram gradientes térmicos mais intensos sem perda de desempenho estrutural. Ainda por Silva e Andrade (2020), a incorporação de novos materiais com comportamento térmico controlado e resistência à fadiga térmica é indispensável para o avanço sustentável e eficiente da tecnologia de conversão de energia térmica em trabalho mecânico.

5.1.4 Avanços na Modelagem de Ciclos Reais

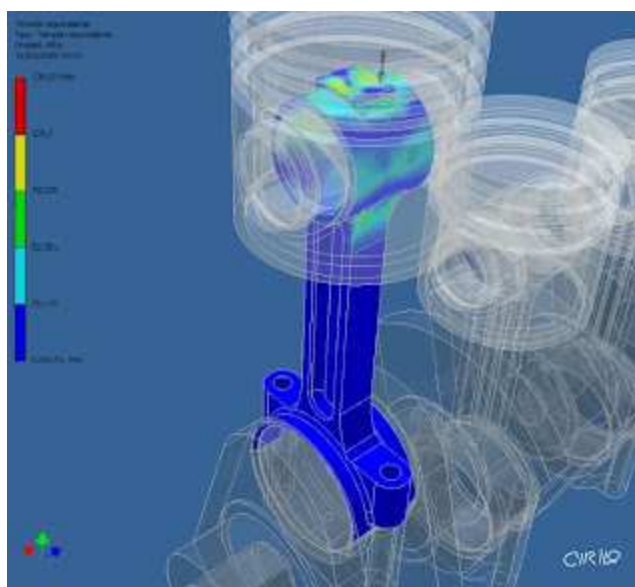
Nos últimos anos, a modelagem de ciclos reais em motores térmicos tem ganhado destaque como um campo de pesquisa e inovação intensas, focado na otimização dos processos de conversão energética e no aumento da eficiência dos motores. Embora os ciclos ideais, como o ciclo de Carnot, sirvam como referência teórica para a eficiência máxima possível, os ciclos reais são influenciados por múltiplas variáveis complexas e por perdas inerentes ao funcionamento dos motores. Compreender essas particularidades é fundamental para aprimorar e adaptar os motores térmicos, visando um desempenho superior (Silva & Oliveira, 2021).

Motores de combustão interna, por exemplo, são objeto de cuidadosa análise termodinâmica para entender como o calor é transferido para peças mecânicas e para o meio

ambiente, e como isso afeta o desempenho do motor. Técnicas modernas permitem simular esses processos com precisão e prever a eficiência real dos motores, como demonstrado por Tonon e Garcia (2017), que utilizaram um modelo quasi-dimensional para analisar motores alternativos, considerando aspectos como transferência de calor e perdas por atrito.

A complexidade dos motores atuais exige técnicas de modelagem que vão além das abordagens clássicas. Ferramentas computacionais avançadas, como a dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), uma área que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, se tornaram essenciais para a análise precisa de ciclos reais.

Figura 17 - Biela na representação CFD



Fonte: Catia e inventor Con Ciri, 2009.

Conforme mostra a figura 17, estas ferramentas simulam o comportamento dos fluidos dentro dos motores, permitindo a detecção de gargalos e oferecendo soluções para maximizar a eficiência térmica. Modelos matemáticos detalhados ajudam a prever como alterações em parâmetros operacionais específicos podem influenciar o desempenho geral, como discutido por Payri et al. (2017), que destacam a importância da CFD na investigação dos processos de combustão e transferência de calor em motores de combustão interna.

Além disso, a integração de algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina nos sistemas de modelagem de ciclos reais está fundamentando um novo paradigma na otimização de motores térmicos. Esses sistemas podem analisar grandes conjuntos de dados derivados de operações reais dos motores e ajustar as condições operacionais para obter eficiência ideal em tempo real. A capacidade de ajustar rapidamente as condições de

operação com base em dados reais é uma das grandes promessas para o futuro da otimização de motores térmicos, como discutido por Li et al. (2020), que demonstram como técnicas de aprendizado profundo podem ser aplicadas para otimização e controle de motores, reduzindo emissões e melhorando a eficiência.

Nos motores modernos, especialmente aqueles integrados a veículos e sistemas industriais de larga escala, a interação entre componentes mecânicos e termodinâmicos demanda um foco específico na modelagem robusta dos ciclos reais. Métodos de análise exergética, que consideram a qualidade e não apenas a quantidade de energia transformada, têm se tornado comuns para a determinação das verdadeiras eficiências de motores térmicos. Ao contrário da abordagem tradicional, que simplesmente calcula a eficiência térmica, a análise baseada em exergia permite identificar onde as perdas de energia são mais significativas e, conseqüentemente, onde os esforços de otimização podem ser mais eficazes, como destacado por Ahmadi et al. (2017), que aplicaram a análise exergética e exergoeconômica em motores de combustão interna para identificar os pontos críticos de irreversibilidade e sugerir estratégias de melhoria.

As melhorias na modelagem também possibilitaram a utilização mais eficiente de eletrônicos e sensores nos sistemas de controle dos motores térmicos. Ao alavancar informações obtidas por sensores distribuídos em várias partes do motor, os modelos podem oferecer estimativas precisas sobre desgaste de componentes, eficiência do combustível e previsões de falhas, resultando em manutenção preditiva e não apenas corretiva. Estes recursos não só prolongam a vida útil dos motores, mas também minimizam o consumo desnecessário de recursos, favorecendo operações mais sustentáveis e econômicas, conforme enfatizado por Lee et al. (2019), que discutem como sistemas baseados em sensores inteligentes e técnicas de diagnóstico preditivo estão transformando a gestão de desempenho e manutenção de motores.

Em síntese, os avanços na modelagem de ciclos reais em motores térmicos refletem uma convergência de várias disciplinas — da termodinâmica clássica à ciência de dados moderna, passando por inovações em materiais e eletrônicos — todas visando um objetivo comum: maximizar o desempenho e a eficiência enquanto se minimizam as perdas e os impactos ambientais. O avanço contínuo nesta área não só assinala melhorias tecnológicas, como também abre caminho para o desenvolvimento de políticas energéticas mais robustas e eficazes em escala global, como apontam Zhao et al. (2019), ao destacar que a integração de modelagem avançada, ciência de dados e políticas sustentáveis é essencial para enfrentar os desafios energéticos e ambientais do século XXI.

5.1.5 Aplicação da Termodinâmica de Tempo Finito

A Termodinâmica de Tempo Finito (FTT) é definida em um ramo da termodinâmica que “estuda o desempenho de sistemas térmicos e de conversão de energia considerando explicitamente as limitações impostas pelo tempo finito de operação, resultando na presença inevitável de irreversibilidades internas e externas” (CHEN; SUN, 2020, p. 3). Essa concepção é de grande fundamento para uma análise e otimização de sistemas reais de operação, pelos quais a maximização de eficiência de energia não pode ser dissociada da potência produzida e das perdas relacionadas à dissipação de energia. Com isso, a FTT pode fornecer modelos que se conciliam com os ideais termodinâmicos.

A termodinâmica em tempo finito tem sido especialmente útil na modelação de sistemas com maior realismo, considerando também as limitações práticas de repasse de calor e a geração da entropia. O uso das ferramentas de balanço de energia e entropia, a análise energética e eficiência de segunda lei presentes em estudos da FTT, permite identificar onde ocorrem as irreversibilidades em maior quantidade e saber como minimizá-las (CHEN; SUN, 2020).

Com isso, os motores térmicos passam a operar mais próximos dos limites teóricos impostos pela eficiência de Carnot, promovendo não apenas a redução do consumo específico de combustível, mas também a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, alinhando desempenho técnico com responsabilidade ambiental, conforme discutido por Liu et al. (2017), Zhang et al. (2018) e Karimi et al. (2020), que exploram a aplicação da termodinâmica de tempo finito na análise e otimização de motores de combustão interna, destacando os ganhos reais obtidos ao minimizar irreversibilidades nos ciclos.

A aplicação da termodinâmica em tempo finito na análise e melhoria dos motores térmicos representa uma das abordagens mais inovadoras dos últimos anos no campo da termodinâmica e engenharia nos motores térmicos. Sendo diferente da termodinâmica clássica, que frequentemente assume que os processos ocorrem em regime estacionário e com tempo infinito para alcançar o equilíbrio, a termodinâmica em tempo finito considera as dinâmicas reais em que os processos acontecem, permitindo uma avaliação mais precisa da eficiência e do desempenho termodinâmico, como destacam Chen et al. (2018) e Yan et al. (2019), que demonstram o impacto dessas abordagens para otimização e controle de motores térmicos em condições práticas.

Uma das principais razões para o interesse crescente nesta área é sua capacidade de lidar com as limitações práticas que ocorrem em motores térmicos durante sua operação. Nos

sistemas reais, os processos de troca de calor e trabalho ocorrem em tempos finitos e estão associados a perdas inevitáveis de energia na forma de calor dissipado e irreversibilidades, que são aspectos críticos que a termodinâmica de tempo finito tenta modelar com precisão (Silva et al., 2017).

A aplicação dessa abordagem é vista particularmente nas turbinas a gás e nos motores de combustão interna, onde o tempo de ciclo é uma variável crítica. A termodinâmica em tempo finito traz uma estrutura no objetivo de otimizar o tempo de operação de cada momento do ciclo e, com isso, minimizar as perdas irreversíveis enquanto maximiza a potência de utilidade. Esse modelo fornece insights sobre ajustes que, nos tempos de troca, podem levar para o alcance de melhorias mais significativas em eficiência sem que possa ter a necessidade de mudanças físicas relacionadas ao design do motor (MA, ZHAO, 2024).

O avanço significativo que chega por meio desta abordagem é uma melhoria na previsão de desempenho nas condições variáveis, como alterações de carga ou variações na temperatura do ambiente. Conforme Ma e Zhao (2024), com a utilização de uma modelagem em tempo finito, se torna possível prever como o motor vai reagir com estas variações, permitindo assim os ajustes preditivos que podem aumentar a eficiência de operação. Essa capacidade adquirida é particularmente valiosa nas aplicações onde o motor fica sujeito a grandes intervalos de funcionamento, em exemplo, nos veículos híbridos e aviões.

Além disso, o desenvolvimento de tecnologias analisadas por computador, como o software de simulação de dinâmica do fluido térmico, tem se unido cada vez mais com a termodinâmica em tempo finito em seus cálculos na otimização do design e na operação dos motores térmicos. Essas ferramentas vão permitir a simulação de diferentes cenários e também os ajustes em tempo real e, assim, decidir rapidamente as melhores estratégias de operação de acordo com as condições de funcionamento (CHEN; SUN, 2020).

Em resumo, a termodinâmica de tempo finito (FTT) pode redefinir a compreensão sobre uma operação mais eficiente dos motores térmicos em condições reais, fornecendo um suporte teórico e prático no intuito de melhorar a concepção e a operação dos motores térmicos contemporâneos, visto que, esses desenvolvimentos reforçam a importância do tempo como variável crítica na otimização de processos térmicos.

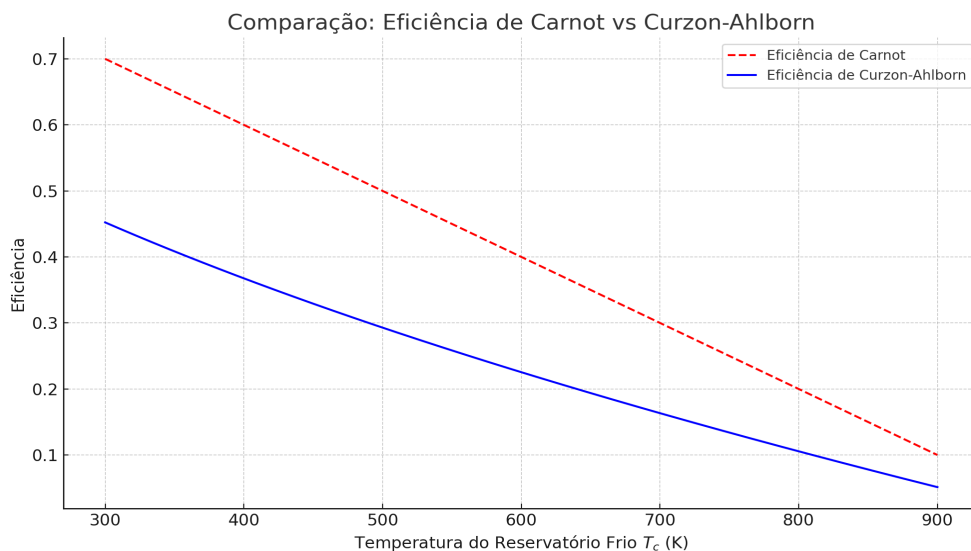
5.1.6 O Modelo de Eficiência de Curzon-Ahlborn

Historicamente, mesmo que o trabalho desenvolvido por Curzon e Ahlborn seja considerado o pioneiro no contexto de formalização do conceito de eficiência em tempo finito, trabalhos anteriores já tinham sido abordados e com ideias semelhantes (JOHAL;

JAYANNAVAR, 2021). Em 1955, Jacques Yvon apresentou um estudo que teve resultado em uma mesma fração de eficiência quando se estuda as usinas de energia reais. Posteriormente, em 1957, Chambadal e Novikov tiveram conclusões semelhantes. Todavia, foi o artigo produzido por Curzon e Ahlborn que fortificou o conceito e deu um impulso no desenvolvimento da termodinâmica de tempo finito como um campo para estudo formal (ZHAO; MA, 2024).

O modelo teórico termodinâmico de Curzon-Ahlborn (CA), proposto em 1975, é considerado uma das principais contribuições no desenvolvimento da (FTT), o mesmo é largamente usado na compreensão e otimização do desempenho de motores térmicos reais. Em formulação diferente em relação ao ciclo de Carnot clássico, que coloca uma “eficiência máxima ideal”, mas que não é atingível, o modelo de eficiência Curzon-Ahlborn deixa evidente as limitações práticas ligadas ao repasse de calor em tempo finito, propondo, assim, uma certa eficiência de energia mais real para os motores que tem operação nas condições de potência máxima.

Figura 18 - Gráfico comparativo: eficiência de Carnot e Curzon-Ahlborn



Fonte: Adaptado de Mintchev et al., 2015.

O gráfico representado na figura 18 compara a eficiência de Carnot com a eficiência de Curzon-Ahlborn em função da temperatura do reservatório frio T_c , mantendo constante a temperatura do reservatório quente T_h . Observa-se que, à medida que T_c se aproxima de T_h , ambas as eficiências tendem a zero, uma vez que a diferença de temperatura, responsável pela realização de trabalho, se reduz. No entanto, a curva da eficiência de Curzon-Ahlborn é sistematicamente inferior à de Carnot em todo o intervalo analisado. Isso ocorre porque a

eficiência de Carnot assume um processo ideal e reversível, enquanto a de Curzon-Ahlborn considera irreversibilidades decorrentes da troca finita de calor, resultando em uma estimativa mais realista da eficiência de motores térmicos que operam com máxima potência.

Uma parte central nessa hipótese do modelo é a formulação da “endorreversibilidade”, que cientificamente induz que o motor térmico é considerado, internamente, reversível, contudo é sujeito às irreversibilidades externas, em especial as resistências térmicas presentes na interface com os “armazéns” de calor. Com essa abordagem, os autores deixam a derivação de uma expressão simples, mas firme, em relação a eficiência na potência máxima de Curzon-Ahlborn

$$n = 1 - \sqrt{\frac{T_c}{T_h}} \quad (11)$$

onde T_h e T_c representam, respectivamente, as temperaturas dos reservatórios quente e frio. A eq. 11 tem se mostrado, de maneira notável e precisa, no que se refere a descrição de muitas máquinas térmicas reais, como as usinas de energia e os motores de combustão interna, superando, possivelmente, a fronteira teórica imposta pelo ciclo de Carnot em relação com a aplicação na prática nas máquinas térmicas (P. HERNÁNDEZ et al., 2016).

No decorrer das últimas décadas, o modelo introduzido por Curzon-Ahlborn tem sido um dos pontos centrais de pesquisas, principalmente no contexto da otimização energética e análise de um certo sistema térmico irreversível. Conforme demonstra Yan et al. (2011), mesmo com uma “simplicidade” do modelo, o mesmo introduz uma base firme no contexto de formular critérios de otimização para o melhor desempenho nos motores térmicos, dando contribuições no desenvolvimento de eficiências melhores nos sistemas. Além disso, pesquisas recentes fortificaram o escopo do modelo de origem, formulando demais tipos de irreversibilidades, como a fricção no interior e dissipação finita, conforme visto por Wang et al. (2012).

De forma notável, Esposito et al. (2010) verificaram progressões do modelo de Curzon-Ahlborn introduzido em diferentes modos de operação, que inclui os ciclos com irreversibilidades no interior e exterior, mostrando que a eficiência de potência máxima não é universal, contudo, tem dependência de condições específicas na operação e das propriedades presente em cada sistema. Em razão disso, essa constatação dá força para a necessidade de um tratamento mais cuidadoso e contextualizado na aplicação do modelo CA em cenários práticos (APERTE et al., 2017).

Tu (2012) demonstrou a aplicabilidade do modelo de Curzon-Ahlborn em relação a descrição de ciclos de motores térmicos de base quântica, deixando evidências da sua relevância em escalas microscópicas no que se refere ao limite entre a termodinâmica clássica e mecânica quântica. Esse avanço deixa destaque no caráter versátil e atual do modelo, isso não apenas no aspecto da termodinâmica e engenharia térmica, mas em áreas emergentes da ciência moderna (CHEN et al., 2022).

Diante do que foi exposto, observa-se que o modelo de Curzon-Ahlborn permanece como sendo uma das bases teóricas de grande importância no meio científico contemporâneo no que se refere ao estudo da eficiência de energia nos motores térmicos. Nas últimas décadas, isso tem impulsionado uma considerável gama de pesquisas que têm a visão no aprimorar da compreensão a respeito das limites reais presentes nos processos de transformação de energia.

5.1.7 Ciclos Alternativos na Termodinâmica de Tempo Finito

Além dos conhecidos ciclos termodinâmicos já utilizados nos motores térmicos, destacam-se ainda os ciclos de “sobre-expansão”, ciclos Atkinson e Miller mencionados anteriormente, que são como uma alternativa aos principais ciclos Otto e Diesel, na busca por maior e melhor eficiência energética térmica. Nas ideias de Ge, Chen e Sun (2018), o motor com ciclo Atkinson (ACE) é um motor de combustão interna (MCI) que faz uma plena expansão dos gases, este foi desenvolvido por James Atkinson, em 1882. De início, o projeto tinha um mecanismo de articulação que possibilita um momento de expansão mais longo do que a fase de compressão, dando permissão a uma recuperação de mais trabalho aproveitável do gás em expansão e, por consequência, existia uma elevação da eficiência térmica.

Além do ACE, o outro motor de relevância nesse contexto é o de ciclo Miller (MCE), que foi patenteado por Ralph Miller em 1947. O MCE de origem tem diferença na empregação de uma “válvula para controle de compressão adicional” na cabeça do cilindro, onde permite variações do tempo no momento do fechamento da válvula de admissão. Esse tipo de modificação tem o resultado em uma compressão efetiva reduzida, contudo, ainda mantém uma expansão por completo, semelhante ao ciclo Atkinson. Estes ciclos têm sido objetos de estudos na ótica da termodinâmica de tempo finito (FTT), e como exemplo, os trabalhos de Ge, Chen e Sun (2018), que fazem comparação das eficiências e potências próprias nos ciclos Otto, Atkinson e Miller, considerando também as irreversibilidades reais, como as perdas de energia por atrito e trocas térmicas.

Esses estudos são de grande fundamento em relação aos motores térmicos, pois eles têm mostrado que, apesar de uma maior complexidade em construção, esses motores no princípio de “sobre-expansão” podem mostrar benefícios significativos ligados ao desempenho e a eficiência de energia térmica, sobretudo quando são modelados com as fronteiras reais propostas por restrições do tempo, certas dissipações e variantes finitos na temperatura, onde são característicos de sistemas estudados pela FTT.

Para ter uma melhor compreensão, uma tabela comparativa, com base nas pesquisas de Ge, Chen e Sun (2018) e Zhao (2017), é proposta, dando destaque aos parâmetros fundamentais no desempenho dos ciclos Otto, Atkinson e Miller em uma concepção dentro da ótica da termodinâmica de tempo finito (FTT). Com isso, torna-se utilizável no objetivo de apresentar as vantagens e compromissos de cada um dos ciclos em meio às irreversibilidades reais nos motores térmicos durante o seu funcionamento.

Tabela 1 - Comparação dos ciclos Otto, Atkinson e Miller na termodinâmica de tempo finito (FTT)

Parâmetro	Ciclo Otto	Ciclo Atkinson	Ciclo Miller
Compressão vs. Expansão	Iguais	Expansão > Compressão	Expansão > Compressão (com controle de válvula)
Eficiência Térmica (η)	Média	Alta	Alta (variável com razão de válvula)
Potência Específica	Alta	Média	Média–Alta
Sensibilidade a Irreversibilidades	Alta	Baixa–média	Média
Complexidade Mecânica	Baixa	Alta	Moderada
Aplicações Modernas	Motores convencionais	Híbridos (Toyota Hybrid System)	Motores turboalimentados com VVT

Fonte: Ge, Chen e Sun (2018); Zhao (2017).

Em uma interpretação da tabela, motores com o ciclo Otto têm o oferecimento de uma alta potência específica, todavia, este é mais comprometido a perdas térmicas e dissipações, e tem o resultado de uma redução na sua eficiência em condições reais. O ciclo Atkinson, em decorrência de expandir mais do que comprimir, consegue adquirir mais trabalho útil, ou seja, energia mecânica, sendo um motor ideal para a aplicação que prioriza mais eficiência ao contrário de potência. O ciclo Miller pode ser uma “solução híbrida”, pois a expansão prolongada é alcançada sem a modificação do curso mecânico do pistão, visto que usa estratégias como um certo atraso no fechar da válvula de admissão (ZHAO, 2017).

Em síntese, esses dados mostram e reforçam que modelos com base na FTT ajudam na explicação dos limites reais em relação ao desempenho e na orientação de escolhas do ciclo para o funcionamento do motor conforme um objetivo (eficiência ou potência), principalmente em sistemas onde existe muitas perdas por atrito, troca térmica finita e tempo de ciclo e as mesmas não podem ser ignoradas. Adicionalmente, e para melhor fundamentação, o gráfico a seguir demonstra um comparativo entre essas eficiências térmicas concebidas nos ciclos Otto, Atkinson e Miller, todavia, com uma base nos modelos simplificados na termodinâmica de tempo finito (FTT).

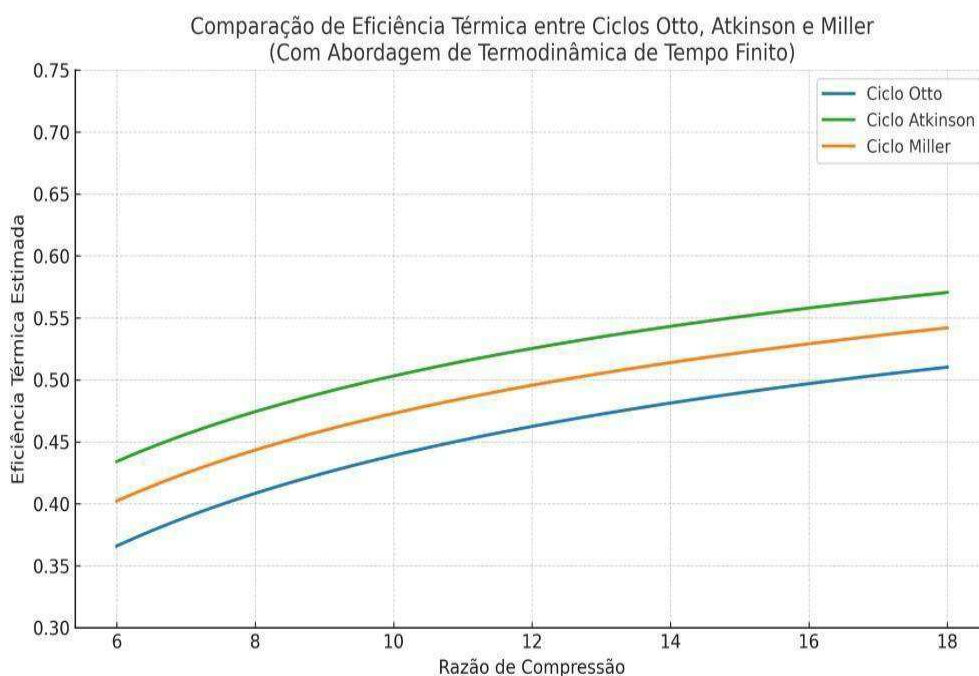


Figura 19 - Comparação da eficiência térmica estimada de ciclos Otto, Atkinson e Miller sob o ponto de vista da Termodinâmica de Tempo Finito (FTT).

Fonte: Adaptado de GE, Chen e Sun (2018) e Zhao (2017).

Conforme mostra a figura 19, o gráfico apresentado tem a ilustração da variação de eficiência térmica projetada para os ciclos termodinâmicos Otto, Atkinson e Miller, usado uma contextualização simplificada da termodinâmica de tempo finito (FTT). Na construção deste gráfico, foram escolhidos parâmetros e considerações que procuram representar em uma forma real as condições de operação dos motores térmicos.

A variável com independência em análise é a razão de compressão, conceituada como uma relação existente entre o volume máximo e o volume mínimo do cilindro durante o ciclo de funcionamento. Essa razão deixa uma influência diretamente na eficiência térmica, visto

que o aumento da compressão eleva a temperatura e a pressão dentro do cilindro, dando possibilidade para uma maior transformação de energia térmica em trabalho útil.

Todavia, as limitações práticas, como a detonação e perdas irreversíveis, colocam restrições aos valores máximos utilizados, tendo uma faixa de compressão considerada entre 6 e 18 e compatível com motores reais. No objetivo de estimar a eficiência térmica, teve a utilização da relação ideal com base no modelo termodinâmico dos motores com gases ideais, onde a eficiência tem dependência da razão de compressão e de capacidades caloríficas específicas $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

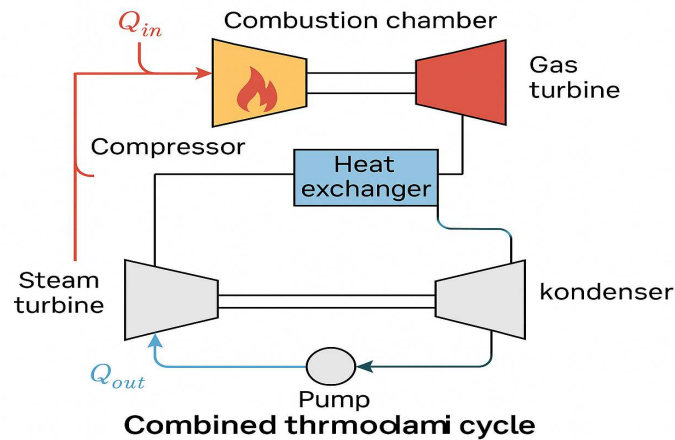
A diferença que existe entre os ciclos também tem presença no definir dos tempos relativos de compressão e expansão, ou seja, o ciclo Otto possui tempos iguais, enquanto que os ciclos Atkinson e Miller apresentam-se com uma expansão prolongada e diferente do tempo de compressão, o que pode resultar em uma maior eficiência da energia térmica.

Dessa forma, o gráfico tem combinação de uma fundamentação termodinâmica ideal mediante ajustes realistas para apresentar uma comparativo significativo do desempenho térmico dos motores, dando ênfase aos benefícios dos ciclos de sobre-expansão quando são analisados sob a visão da termodinâmica de tempo finito.

5.1.8 Avanços em Ciclos Termodinâmicos Combinados

Estudos para com os ciclos termodinâmicos combinados representam um dos maiores avanços na busca pela eficiência energética nos motores térmicos. Na integração de múltiplos ciclos de conversão térmica, esses sistemas podem aproveitar melhor a energia disponível, reduzindo significativamente as perdas e aumentando consideravelmente a eficiência completa dos motores. Nos últimos anos, os avanços em tecnologia, materiais e modelagem computacional têm levado a mais melhorias notáveis nesses sistemas, tornando-os como um componente fundamental na geração de energia na era moderna (PRADELLE, 2023).

Figura 20 - Brayton - Rankine combinado



Fonte: Adaptação em Perez e Gonzalez, 2021.

A concepção de ciclos combinados, representado na figura 20, envolve geralmente a integração de um ciclo de alta temperatura, o ciclo de Brayton, com um ciclo de baixa temperatura, ciclo de Rankine. Nesta, energia residual no primeiro ciclo, naturalmente perdida em sistemas convencionais, tem uma utilidade para alimentar o segundo ciclo. Neste processo, existe a permissão de uma recuperação de calor eficaz, resultando assim em uma eficiência superior. Essa integração tem mostrado uma eficiência global ultrapassando 60%, sendo um salto significativo em comparação aos 30-40% típicos de ciclos isolados (CARVALHO, 2021; SILVA, 2023).

Nos sistemas com ciclo combinado gás-vapor, por exemplo, a combustão inicial vai ocorrer em uma turbina a gás (ciclo de Brayton), cuja energia residual é utilizada para produzir o vapor em um gerador de recuperação e assim acionar uma turbina a vapor (ciclo de Rankine). Com esta configuração, tem-se o aproveitamento máximo do potencial energético do combustível, sendo o gás natural ou uma alternativa renovável, como o biogás (UBERTI; INDRUSIAK, 2015).

Além disso, as inovações em controles avançados e automação estão transformando as operações de ciclos combinados. Os sistemas de controle sofisticados fazem o monitoramento continuamente das variáveis do sistema, ajustando-as em tempo real no objetivo de garantir uma máxima eficiência de operação e resposta ágil para com as variações de carga e demanda. Devido a isso, não vai apenas melhorar a eficiência energética, mas também prolongar a vida útil dos componentes e redução da necessidade de manutenção frequente (PEREIRA, 2023).

A integração das fontes de energia renováveis, como solar térmica e biomassa, aos ciclos termodinâmicos combinados está em uma crescente expansão. Nesta razão, a

hibridização desses ciclos com os sistemas de energia renovável melhora a mitigar as emissões de carbono e responde à demanda por mais tecnologias verdes e sustentáveis. Através de inovadores sistemas, sendo os armazéns de calor, e estratégias de cogeração, esses sistemas podem obter uma flexibilidade operacional superior, sendo a mesma necessária para lidar com a variabilidade das fontes renováveis (CAMPOS et al., 2024).

Ora, esses avanços não vão representar somente uma melhora significativa na eficiência dos ciclos termodinâmicos combinados, como também fornecer uma resposta de eficácia às necessidades crescentes por uma energia sustentável e eficiente. A possibilidade de maximizar o utilidade do calor residual e integração de fontes renováveis se torna uma prova do potencial contínuo para inovações no campo da termodinâmica aplicada, destacando também a força energética por meio dos ciclos combinados como um pilar central para a futura matriz de energia

6 CONCLUSÃO

O estudo que foi desenvolvido no decorrer do presente trabalho permitiu compreender, em uma forma mais aprofundada, a importância da termodinâmica como uma ferramenta de grande fundamento na análise, avaliação e otimização no que refere-se ao desempenho dos motores térmicos. Através da abordagem teórica adotada, mostrou-se que, mesmo que estes tipos de sistemas estejam submetidos a limites naturais impostos por leis da termodinâmica, pode existir um espaço significativo para progressos tecnológicos e atualizações de melhorias a respeito da eficiência energética, devido ao reconhecimento e controle das irreversibilidades que estão presentes nos processos reais.

Fisicamente, os motores térmicos convertem a energia térmica para o trabalho mecânico através dos ciclos termodinâmicos que envolvem a compressão, combustão e expansão de substâncias de trabalho (como os gases e vapor). No entanto, no decorrer dessas transformações, ocorrem as perdas inevitáveis de energia, principalmente na forma de calor dissipado, que estão associadas ao aumento de entropia e aos limites de conversão energética descritos na Segunda Lei da Termodinâmica. Esse princípio físico estabelece que não há processo de conversão de energia que pode ser eficiente por completo, ou seja, sempre haverá produção de entropia e dispersão de uma certa parcela de energia (ÇENGEL; BOLES, 2015).

Na visão da termodinâmica, teve-se uma possibilidade de constatar que a análise de ciclos reais (Otto, Diesel, Brayton e Rankine) necessita do reconhecimento das irreversibilidades internas (como o atrito, a condutividade térmica finita e dissipação viscosa) e externas (como as trocas de calor imperfeitas e perdas por exaustão). Nesse contexto, surge a Termodinâmica de Tempo Finito (FTT – *Finite Time Thermodynamics*), que fica sendo uma abordagem mais moderna e sem dispensa, pois a mesma tem a consideração de limitações práticas como o tempo de processo e resistências térmicas finitas, oferecendo assim alguns modelos mais realistas de otimização de eficiência e maximização da potência útil do motor.

Além disso, teve-se a evidência de que a eficiência de energia dos motores térmicos pode ter um certo aumento por meio de diferentes estratégias, como a utilização de materiais avançados mais resistentes em altas temperaturas; sistemas de regeneração de calor; otimização de ciclos; técnicas para o controle ativo e melhorias em relação ao design termodinâmico. Esses avanços e estudos têm sustentação em princípios clássicos, como o Primeiro Princípio da Termodinâmica (a conservação da energia), e com otimização com base nas análises derivadas da Segunda Lei.

Portanto, os progressos observados nos últimos anos mostram que a atuação conjunta entre a teoria termodinâmica, inovação tecnológica e engenharia de sistemas tem a capacidade de conduzir um desenvolvimento de motores térmicos com mais eficiência, com menos poluição e, energeticamente, sustentáveis. Ademais, mesmo que a eficiência de Carnot continue sendo um limite teórico intransponível, estudos indicam que existem possibilidades em aproximar-se dessa eficiência por meio de abordagens que podem minimizar perdas e equilibrar o desempenho e a viabilidade na prática.

A termodinâmica continua sendo uma base teórica de grande fundamento no intuito de identificar os pontos críticos nesses estudos e propor caminhos viáveis e possíveis para superá-los, mesmo que seja parcialmente. Conclui-se, portanto, que a Termodinâmica, na integração de conhecimentos de Física, Engenharia e Ciência dos Materiais, continua a desempenhar um papel central em relação ao aprimoramento dos motores térmicos. Diante dos limites impostos por leis naturais, o progresso científico e tecnológico, unidos na termodinâmica, tem proporcionado constantes melhorias, indicando que o futuro desses sistemas tem ligação direta com a capacidade da ciência em continuar traduzindo princípios fundamentais para o meio prático.

Os motores térmicos, distantes de serem obsoletos, seguem em uma plena evolução, pois estão orientados por uma compreensão continuamente mais refinada dos fenômenos físicos que governam-os. Dessa forma, tem-se a conclusão de que os motores térmicos continuam sendo um objeto de estudo estratégico para com o futuro da energia e que, uma aplicação mais profunda dos conceitos termodinâmicos não vai apenas contribuir no seu aperfeiçoamento de eficiência, como também na formação de uma consciência energética com fundamento na ciência e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, P. et al. Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a turbocharged engine based on exergetic, exergoeconomic and environmental analyses. *Energy Conversion and Management*, v. 132, p. 216-230, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>. Acesso em: 27 maio 2025.
- Al-Ammar, E. A., Al-Ashwal, R. H., & Al-Mashaqbeh, I. A. (2020). Review on the performance of solar Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109886.
- ANDRADE, T.; SANTOS, J. Materiais de baixo atrito e sua aplicação em motores. *Revista Brasileira de Tecnologia Avançada*, v. 12, n. 2, p. 102-112, 2018.
- ANGULO-BROWN, F. A simple thermodynamic model of a finite-time Carnot engine. *Journal of Applied Physics*, v. 69, n. 12, p. 7465–7469, 1991.
- APERTET, Yann et al. True nature of the Curzon-Ahlborn efficiency. *Physical Review E*, v. 96, n. 2, p. 022119, 2017.
- ASSUNÇÃO, Daniel & Andrade, Vítor. (2021). Análise de Eficiência Térmica dos Motores Aeronáuticos TURBOFAN. *Exatas & Engenharias*. 11. 18-43. 10.25242/885X113420212349.
- ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. Físico-química. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- AWOGBEMI, Omojola et al. Uma visão geral da classificação, produção e utilização de biocombustíveis para aplicações em motores de combustão interna. *Energias*, v. 14, n. 18, p. 5687, 2021.
- AZEVEDO, Marcelo Henrique de. Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro. 2018.
- BALDOW R., MONTEIRO JR, F. N. Os Livros Didáticos de Física e Suas Omissões e Distorções na História do Desenvolvimento da Termodinâmica. *Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, v.3, n.1, p.3-19, maio 2010.
- BÍBLIA. A Bíblia Sagrada. 3. ed. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 2009.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. Fundamentals of thermodynamics. John Wiley & Sons, 2020.
- CAMPOS, L. S. et al. Revisão sistemática comparativa de ciclos combinados de geração de energia baseados em gaseificação de biomassa e gás natural/biomassa. *Revista Brasileira de Energia*, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/378389455>. Acesso em: 29 maio 2025.

CAMPOS, M.; OLIVEIRA, R. Manutenção preditiva em motores térmicos: uma abordagem integrada. *Journal of Mechanics*, v. 10, n. 3, p. 250-267, 2019.

CARVALHO, M. A. S. d. Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. Dissertação (Mestrado), 2016.

CARVALHO, Márcio A. S. Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. Universidade Federal da Bahia. 2011, Salvador - Brasil.

CARVALHO, Pedro César Corrêa. Análise termodinâmica de uma termelétrica operando com ciclo combinado brayton-rankine. 2021.

CAVALCANTI, L. F.; MOREIRA, D. R. Aplicações de sistemas de recuperação de calor em motores térmicos: análise termodinâmica e impactos energéticos. *Revista de Engenharia e Energia*, v. 12, n. 1, p. 55–68, 2020.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica: uma abordagem aplicada. 9. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica: uma abordagem com base na engenharia. 8. ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2015.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica: uma abordagem prática. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2019.

CHEN, L., Sun, F., & Wu, C. (2017). Finite time thermodynamic modeling and analysis of Stirling engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 168-175.

CHEN, L.; SUN, F. Advances in Finite Time Thermodynamics: Energy, Entropy, Exergy. *Applied Energy*, v. 264, p. 114728, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114728.

CHEN, W. et al. The benefits of regenerative braking in hybrid vehicles. *Automotive Advances and Researches*, v. 15, n. 3, p. 375-389, 2020.

CHEN, Y. H. et al. Microscopic theory of the Curzon-Ahlborn heat engine based on a Brownian particle. *Physical Review E*, v. 106, n. 2, p. 024105, 2022.

Colonna, P. et al. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(10), 100801. 2015.

COSTA, A.; MARTINS, F. Future trends in energy systems: the role of technological innovation. *Green Energy Journal*, v. 7, n. 4, p. 404-418, 2021.

COSTA, Leonardo F.; TAVARES, Bruno M. Otimização aerodinâmica e desempenho energético em motores de propulsão. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 40, n. 3, p. 215-230, 2018.

COSTA, R.; LIMA, V. Cogeração e eficiência energética em processos industriais. *Energy Systems Review*, v. 8, n. 1, p. 69-83, 2018.

CRUZ, José Ramón Serrano et al. *Processos e tecnologia de máquinas e motores térmicos*. Imprensa da Universidade Politécnica de Valência, 2020.

CUNHA, L.; RIBEIRO, M. Tecnologias de combustão limpa e sua implementação industrial. *Jornal de Ciências Energéticas*, v. 14, n. 5, p. 225-239, 2021.

DE SOUZA, Raúl Clemente; REYNA-TENORIO, Luis Jheovanny; CHERE-QUIÑÓNEZ, Byron Fernando. Cogeneración eléctrica a través de turbina de gas: una visión desde los empresarios en Manabí. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, v. 3, n. 6, p. 237-250, 2022.

DENG, S. Application of metal-based, polymer-based and ceramic-based composites in thermal engines. *Applied and Computational Engineering*, v. 89, p. 9-13, 2024. Disponível em: <https://www.ewadirect.com/proceedings/ace/article/view/16813>. Acesso em: 26 maio 2025.

FERNANDES, M. et al. Avanços no uso de materiais cerâmicos em motores de combustão interna. *Química Nova*, v. 42, n. 3, p. 340-352, 2019.

FERREIRA, J. M.; ANDRADE, P. R. Otimização de parâmetros operacionais de motores térmicos por algoritmos genéticos. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 41, n. 2, p. 210–225, 2019.

FERREIRA, P.; CARVALHO, S. Desenvolvimento de combustíveis avançados para motores térmicos. *Fuel and Energy Journal*, v. 16, n. 2, p. 90-101, 2019.

Formosa, F., & Despesse, G. (2010). Analytical model for Stirling cycle machine design. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1855-1863.

FRANCO, J. C.; et al. Comparativo do consumo de combustível e emissões conforme eletrificação veicular. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26048/1/consumocombustivelconformeeltrificacao.pdf>. Acesso em: 07 de abril de 2025.

FRANGOPOULOS, C. A. Exergy, energy system analysis and optimization. In: YAN, J. (ed.). *Handbook of clean energy systems*. Hoboken: Wiley, 2018.

GARCIA, A.; MARTÍNEZ-BOGGIO, S.; BLASCO, R.; TISEIRA, A. Advanced engine management systems: A review of real-time optimization techniques for energy efficiency. *Applied Energy*, v. 344, p. 120221, 2023.

GE, Y.; CHEN, L.; SUN, F. Finite time thermodynamic modeling and analysis for irreversible Otto, Miller and Atkinson cycles. *Entropy*, v. 20, n. 1, p. 75, 2017. DOI: 10.3390/e20010075.

GIAMPAOLO, T. Gas turbine handbook: principles and practice. 5. ed. Aalborg: River Publishers, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003151821>. Acesso em: 20 abr. 2025.

GOES, W. U. de; GUPTA, M.; MARKOCSAN, N.; THIBBLIN, A.; VESELÝ, Z.; HONNEROVÁ, P. Porous thermal barrier coatings for enhancing the efficiency of internal combustion engines. *International Journal of Engine Research*, v. 24, n. 4, p. 1589–1602, 2023. DOI: 10.1177/14680874221093143.

GOMES, L. F.; SILVA, R. A.; PEREIRA, M. C. Avanços em materiais para aplicações térmicas extremas: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 43, n. 2, p. 215-230, 2021.

HERNÁNDEZ, Palacios; RIVERA, Armando Antonio Laguna; AUGUSTO, Cesar. LA IDEA DE EQUILIBRIO – DESEQUILIBRIO DEL CALÓRICO EN EL CICLO DE CARNOT: un análisis para la enseñanza de los procesos térmicos. 2023. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional de Colombia - Facultad de Ciencia y Tecnología, Bogotá D.C, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/18650>. Acesso em: 23 maio 2025.

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

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2021. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Acesso em: 6 abril. 2025.

JENKINS, J. G. Engines: Engines of the 19th Century. London: Oxford University Press, 1983.

JIMÉNEZ-GARCÍA, José C. et al. A comprehensive review of organic rankine cycles. *Processes*, v. 11, n. 7, p. 1982, 2023.

JOHAL, Ramandeep S.; JAYANNAVAR, Arun M. The many avatars of Curzon-Ahlborn efficiency. *Resonance*, v. 26, p. 211-225, 2021.

JÚNIOR, A.; NASCIMENTO, T. Hybrid vehicle systems and energy efficiency analysis. *International Journal of Automotive Engineering*, v. 22, n. 1, p. 115-130, 2018.

KARIMI, M.; SALEHI, M.; VAFAMAND, N. Performance analysis and optimization of internal combustion engines using finite-time thermodynamics. *Energy Reports*, v. 6, p.

98-107, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.010>. Acesso em: 27 maio 2025.

KAUR, J.; JOHAL, R. S. An Effective Flux Framework for Linear Irreversible Heat Engines: Case Study of a Thermoelectric Generator. *Entropy*, v. 26, n. 3, p. 219, 2024.

KHAMIS, I. (2012). Prospects of nuclear power in GCC countries. *Energy Policy*, 43, 131-138.

KLEIN, Rupert; NADOLSKI, Maikel; ZENKER, Christian; OEVERMANN, Michael; PASCHEREIT, Christian O. Pressure gain combustion for gas turbines: Analysis of a fully coupled engine model. *arXiv preprint*, 22 abr. 2024.

KROETZ, Tiago. Revisiting and comparing the Carnot Cycle and the Otto Cycle. *Revista Brasileira de Ensino de Física, Prato Branco*, v. 46, p. 1-8, jan. 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2023-0318>.

KUMAR, Anil; SINGH, Rajesh; SHARMA, Pankaj. Advanced ceramic materials for high-temperature applications in thermal engines: properties and performance. *Journal of Materials Science and Engineering*, v. 10, n. 3, p. 215-229, 2022.

LADINO, Delfino et al. Análisis del Desempeño de un Ciclo tipo Carnot vía Relaciones de Semisuma de Diferentes Expresiones de su Eficiencia. *Información tecnológica*, v. 27, n. 5, p. 111-120, 2016.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LECOMPTE, S., Huisseune, H., van den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2017). Part load based thermo-economic optimization of the organic Rankine cycle (ORC) applied to a combined heat and power (CHP) system. *Applied Energy*, 205, 1043-1054.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3-8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>. Acesso em: 27 maio 2025.

LEE, J.; KIM, H. Advances in nanomaterials-based lubricants for enhanced friction reduction and wear resistance: A review. *Tribology International*, v. 170, p. 107543, 2022.

LI, H.; ZHANG, Y.; WANG, J. Recent advances in thermodynamic cycle optimization and waste heat recovery for improving engine efficiency. *Applied Thermal Engineering*, v. 229, p. 120649, 2023.

LI, X.; LI, L.; ZHANG, C.; ZHOU, X. Deep learning-based optimization method for real-time engine control. *Applied Energy*, v. 268, p. 114946, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114946>. Acesso em: 27 maio 2025.

LIMA, G.; PEREIRA, H. Estudos sobre ciclos termodinâmicos avançados para maior eficiência energética. *Journal of Advanced Thermodynamics*, v. 9, n. 2, p. 233-245, 2019.

LIU, B., Zhang, X., Wang, X., & Wang, H. (2019). Waste heat recovery from internal combustion engines using Organic Rankine Cycle: A review of recent progress. *Energy Conversion and Management*, 199, 112021.

LIU, Haifeng et al. Investigação sobre o potencial de alta eficiência para motores de combustão interna. *Energias*, v. 11, n. 3, p. 513, 2018.

LIU, J.; WANG, R.; CHEN, L. Finite-time thermodynamics analysis of internal combustion engines with consideration of irreversibility. *Energy Conversion and Management*, v. 153, p. 108-117, 2017.

MA, Y.-H.; ZHAO, X.-H. Finite-time thermodynamics: A journey beginning with optimizing heat engines. *arXiv preprint, arXiv:2411.03853*, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2411.03853>. Acesso em: 29 maio 2025.

MARTÍNEZ P. J., et al. (2019). An overview of Stirling engine modeling using classical thermodynamics and finite-time thermodynamics. *Applied Energy*, 250, 1095-1112.

MARTINS, R. C.; ALMEIDA, V. F. Materiais avançados para eficiência energética em sistemas térmicos. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 42, n. 3, p. 215–230, 2020.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. *Fundamentos da termodinâmica técnica*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MORAWSKI, A. P. et al. Avaliação termodinâmica da repotenciação de usinas termelétricas equipadas com motores de combustão interna por meio da recuperação de calor residual. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 9., 2016. Anais [...]. [S.l.]: ABCM, 2016. p. 1–10.

MOURA, Cassiano Metier et al. Análise termodinâmica de um módulo compacto baseado no ciclo Stirling para a recuperação da energia dos gases de escape de um motor de combustão interna. 2017.

MOURÃO, F.; ALVES, R. Possibilidades do hidrogênio verde como substituto dos combustíveis fósseis. *Renewable Energy Insights*, v. 5, n. 4, p. 276-289, 2020.

MÜLLER, Carlos Henrique; FREITAS, Larissa Nogueira. Avanços em materiais de alta performance aplicados à termodinâmica de motores térmicos. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 42, n. 3, p. 215–229, 2020.

NUNES, F.; BARROS, P. Recuperação de energia na produção de alimentos: um estudo aplicado. *Food Engineering Review*, v. 13, n. 2, p. 200-214, 2019.

OLIVEIRA, A.; SOUSA, M. Aplicações de combustíveis alternativos na eficiência de motores. *Renewable Resources Journal*, v. 17, n. 5, p. 505-522, 2020.

OLIVEIRA, C.; SANTOS, E. Implementação prática de recuperação de calor em motores térmicos. *Revista de Sistemas Térmicos Aplicados*, v. 11, n. 4, p. 390-405, 2020.

OLIVEIRA, Carlos Daniel Gomes et al. MOTOR STIRLING. In: *Anais do UNIC-Congresso Regional de Práticas Investigativas*. 2017. p. 217-218.

PÁEZ-HERNÁNDEZ, Ricardo T. et al. An analytical study of the endoreversible Curzon–Ahlborn cycle for a non-linear heat transfer law. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, v. 41, n. 1, p. 19-27, 2016.

PARIZZI, Elenica Biassi. Análise termodinâmica de um ciclo combinado Brayton e Rankine orgânico. 2020.

PAYRI, F.; BENAJOAS, J.; MARTÍN, J.; GARCÍA, A. A CFD study of the influence of nozzle geometry over the spray characteristics in direct injection diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, v. 123, p. 670-682, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.074>. Acesso em: 27 maio 2025.

PEREIRA, Mateus Gomes. Determinação teórica da eficiência de ciclos combinados em usinas de cogeração. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PEREIRA, V.; COSTA, K. Uso de colunas de destilação termoacopladas na indústria química. *Chemical Processes Journal*, v. 14, n. 3, p. 330-348, 2020.

PRADELLE, Florian Alain Yannick. Análise técnica, econômica e ambiental de usinas termelétricas alimentadas por biomassa residual operando com ciclos combinados híbridos. 2023. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

QUOILIN, S., Declaye, S., Tchanche, B. F., & Lemort, V. (2021). Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110586.

RIBEIRO, M. C.; SANTOS, A. F. Otimização termodinâmica da combustão interna em motores automotivos: estratégias e impactos energéticos. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica Aplicada e Computacional*, v. 9, n. 2, p. 87–101, 2019.

RODRÍGUEZ, D. A.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, R. Performance analysis of irreversible Diesel engines using Finite Time Thermodynamics and ecological criteria. *Applied Thermal Engineering*, v. 187, p. 116535, 2021.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Exergy analysis of combined power and refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, v. 199, p. 111984, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111984.

SEARS, David R.; TAYLOR, Robert M. *Stirling Engines: Design and Feasibility for High Efficiency Applications*. 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020.

SILVA, C.; RODRIGUES, L. Monitoramento em tempo real e controle de motores térmicos. *Energy and Automation Journal*, v. 24, n. 2, p. 85-98, 2021.

SILVA, J.; NETO, L. Nanomateriais e a nova era da engenharia térmica. *Materials Science and Engineering Journal*, v. 21, n. 6, p. 601-619, 2021.

SILVA, João; ANDRADE, Marcos. Avanços em materiais para motores térmicos: impactos na eficiência termodinâmica. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 45, n. 3, p. 234-245, 2020.

SILVA, R. S. Simulação termodinâmica dos ciclos de Rankine e combinado Brayton-Rankine utilizando Simulink. Trabalho de Conclusão de Curso — Escola de Engenharia, USP, 2023.

SOUSA, Anna Karollyni Lopes. 1ª Lei da Termodinâmica a partir do conceito de entropia. 2021. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2021

SOUZA, M. T.; ANDRADE, L. P. Otimização energética em motores térmicos: fundamentos e aplicações contemporâneas. *Revista Brasileira de Termociência*, v. 18, n. 2, p. 101–117, 2021.

SZYBIST, James P. et al. Advanced Combustion Strategies and Fuels for High-Efficiency, Low-Emissions Engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 84, p. 100899, 2021.

TONON, R.; GARCIA, G. J. Análise termodinâmica de motores de combustão interna de tipo alternativo usando um modelo quasi-dimensional. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 2017, Joinville. Anais [...]. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-termodinmica-de-motores-de-combustao-interna-de-tipo-alternativo-usando-um-modelo-quasi-dimensional-26565>. Acesso em: 27 maio 2025.

Tu, Z. C. (2012). Efficiency at maximum power of Feynman's ratchet as a heat engine. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 45(45), 455003. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/45/45/455003>

UBERTI, Vinícius André; INDRUSIAK, Maria Luiza Sperb. Modelagem e estudo de rendimento termodinâmico de ciclos combinados de geração termelétrica. *Revista Liberato*, v. 16, n. 25, p. 7-20, 2015.

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. Fundamentos da termodinâmica clássica. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

VATIN, François. What is watt?: história de uma medida. *Laboreal*, v. 14, n. Nº1, 2018. Disponível em: <http://www.laboreal.up.pt/pt/articles/what-is-watt-historia-de-uma-medida/>. Acesso em 15 abr. 2025.

WANG, Y., HE, J. Z., & WU, F. (2012). The performance analysis of irreversible Carnot engine with heat transfer laws of generalized convective type. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.010>

WILSON, J. R.; SMITH, A. B.; JOHNSON, C. D. High-performance titanium and nickel alloys in thermal systems: applications and advancements. *Journal of Materials Science and Engineering*, v. 45, n. 3, p. 123-134, 2024.

WU, H. et al. Finite time thermodynamic optimization and exergy analysis of a solar-assisted hydrogen-fueled heat engine. *Energy*, v. 239, p. 121914, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121914.

YAN, Z., CHEN, J., & ANDRESEN, B. The Curzon-Ahlborn efficiency and its connection to thermodynamic optimization. *Entropy*, 13(3), 579-585. 2011. <https://doi.org/10.3390/e13030579>

ZHANG, J., BAO, J., & XU, G. (2020). Performance enhancement of organic Rankine cycle with fluid mixtures: A review. *Renewable Energy*, 147, 1110-1128.

ZHANG, Wei; LIU, Hao; WANG, Ming. Advances in high-performance materials for thermal engines: A review. *Materials Science and Engineering: A*, v. 812, p. 141045, 2021.

ZHANG, Y., et al. (2019). Performance and optimization of a regenerated Brayton cycle considering finite-time thermodynamic constraints. *Energy Conversion and Management*, 196, 175-185.

ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, J. Optimization of internal combustion engine cycles based on finite-time thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, v. 137, p. 31-38, 2018.

ZHAO, H.; WANG, Z.; YU, X.; WANG, L. Multidisciplinary approach for advanced internal combustion engine developments in the era of big data and artificial intelligence. *Energy Reports*, v. 5, p. 190-197, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.01.003>. Acesso em: 27 maio 2025.

ZHAO, Jinxing. Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines—A review. *Applied Energy*, v. 185, p. 300-319, 2017.

ZHAO, Xiu-Hua; MA, Yu-Han. Revisiting Curzon-Ahlborn heat engine: Extending the Yvon engine. arXiv preprint, arXiv: 2412.13925, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2412.13925>. Acesso em: 30 jun. 2025.