

## Eficiência Energética em Motores a Combustão e Elétricos

Guilherme da Silva Oliveira Nascimento<sup>1</sup>, Lucas Theodoro Cirino<sup>1</sup>, Robert Borges dos Santos Castro<sup>1</sup>.  
[82011234@ulife.com.br](mailto:82011234@ulife.com.br), [820150090@ulife.com.br](mailto:820150090@ulife.com.br), [8222243419@ulife.com.br](mailto:8222243419@ulife.com.br)

Professor orientador: Gustavo Caravita de Andrade.

Coordenação de curso de Engenharia Mecânica.

### Resumo

Este estudo comparou a eficiência energética e os impactos ambientais gerados por veículos elétricos e movidos a combustão interna, principalmente os de ciclo Otto. Utilizando para isto, uma abordagem bibliográfica embasada em artigos, livros, revistas e dados obtidos de instituições e órgãos governamentais relacionados ao tema, tendo como principal fonte de dados para a comparação entre os veículos, o PBEV. Após realizadas as devidas análises, evidenciou-se que os veículos que utilizam motores elétricos como meio de propulsão, apresentam uma eficiência em torno de 90% e um menor índice de emissão de poluentes em comparação com os veículos movidos a combustão interna, que tem sua eficiência em torno de 30%, podendo chegar a 45% em motores a Diesel. Os veículos elétricos, todavia, ainda enfrenta dificuldades em relação a autonomia e infraestrutura para abastecimento.

Palavras-chave: eficiência energética; motores a combustão; motores elétricos; impactos ambientais; sustentabilidade.

### 1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um tema que vem sendo cada vez mais discutido, inclusive no setor automobilístico, como uma maneira de reduzir os impactos ambientais causados pelas ações humanas, desenvolvendo novas tecnologias para um melhor aproveitamento da energia e, conseqüentemente, reduzindo o consumo tanto de combustíveis fosseis quanto dos biocombustíveis e até mesmo da própria eletricidade, de forma a liberar menos gases poluentes na atmosfera.

Os veículos que funcionam por motor a combustão interna são os mais populares e aceitos pelos consumidores atualmente, todavia também são eles que apresentam uma menor eficiência no consumo de combustível e a maior emissão de gases poluentes durante o ciclo de funcionamento, por este motivo desenvolveu-se como alternativa, os veículos elétricos que não utilizam combustíveis fosseis e nem geram resíduos poluentes durante seu funcionamento, contudo estes modelos encontram certa dificuldade de expansão dentro do mercado.

Desde 2009, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) classifica os veículos leves de acordo com a eficiência energética de cada modelo, o consumo de combustível e a emissão de CO<sub>2</sub>, através do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV). Este programa auxilia o consumidor na hora de adquirir um veículo, facilitando a comparação entre os modelos de veículos disponíveis no mercado, todavia, muitas pessoas não conhecem o funcionamento e os pontos positivos e negativos dos principais tipos de motores utilizados na construção dos veículos.

Esta pesquisa tem como principal foco explicar as principais característica dos motores elétricos e de combustão interna, e compará-los explicitando os prós e contras de cada um deles

---

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade São Judas Tadeu.

e como eles podem afetar tanto o consumidor quanto o meio ambiente. Assim, tornando o tema mais acessível inclusive para aqueles que não possuem conhecimentos técnico aprofundados em mecânica.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

Ao refletirmos sobre mobilidade, muitas vezes ignoramos a importância dos motores a combustão e elétricos no transporte eficaz e seguro de pessoas e bens. Esses motores desempenham um papel essencial no deslocamento diário, proporcionando rapidez e precisão.

Essa relevância está diretamente ligada à evolução tecnológica dos motores de combustão interna, que passaram por constantes aperfeiçoamentos ao longo do tempo. Seu desenvolvimento foi crucial para o progresso da mobilidade contemporânea, permitindo avanços significativos na forma como nos deslocamos.

No entanto, a criação desses motores é mais complexa do que aparenta. Compreender sua evolução exige uma análise histórica que remonta à invenção do primeiro motor a combustão e ao aperfeiçoamento contínuo de seus mecanismos.

Hoje, a eficiência energética se destaca como um dos principais critérios no setor automobilístico. Esse aspecto influencia diretamente o preço de mercado e a aceitação dos automóveis, refletindo a busca por maior sustentabilidade e viabilidade econômica.

### **2.1. O ciclo Otto e o surgimento dos motores a combustão**

O ciclo de Otto tem uma ligação profunda com o trabalho pioneiro do engenheiro francês Alphonse Beau de Rochas<sup>2</sup>. Em 1862, ele registrou uma invenção revolucionária para motores de combustão interna de quatro tempos, que se fundamentava na combustão de uma combinação de ar e combustível comprimidos antes da ignição. Apesar de serem subestimadas na época e sem a criação de um protótipo, as teorias de Beau de Rochas foram cruciais para os progressos subsequentes na engenharia.

Nikolaus Otto<sup>3</sup> implementou essas ideias, convertendo-as em um motor eficiente. Ele criou e aprimorou o primeiro motor de combustão interna realmente funcional, lançando as fundações para o setor automobilístico contemporâneo. Este acontecimento reforçou a relevância do ciclo de Otto no progresso dos motores e nos sistemas de transporte.

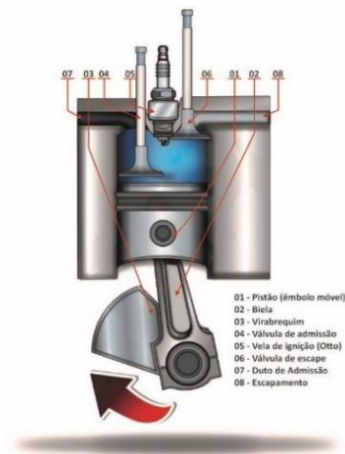
Para entender o funcionamento do motor de ciclo Otto, é essencial explorar seus principais componentes. Cada componente tem um papel fundamental na transformação da energia térmica produzida pela combustão em trabalho mecânico, possibilitando o funcionamento eficaz e confiável do motor.

---

<sup>2</sup> Alphonse Beau de Rochas: em 1815, em Paris, França, nasceu um engenheiro que ficou conhecido pelo princípio do motor de combustão interna de quatro tempos. Sua contribuição destacou a importância de comprimir a mistura de ar e combustível antes da ignição, melhorando a eficiência do motor.

<sup>3</sup> Nikolaus Otto: nascido em 1832 em Holzhausen, Nassau, Alemanha, é mais conhecido por ter criado o motor de combustão interna de quatro tempos, que transformou a indústria automobilística. Durante sua carreira, Otto criou diversas inovações que firmaram sua marca na história da engenharia mecânica. Em 1891, ele veio a falecer em Colônia, deixando um legado crucial para o avanço da tecnologia.

Figura 1 – Componentes do sistema Otto

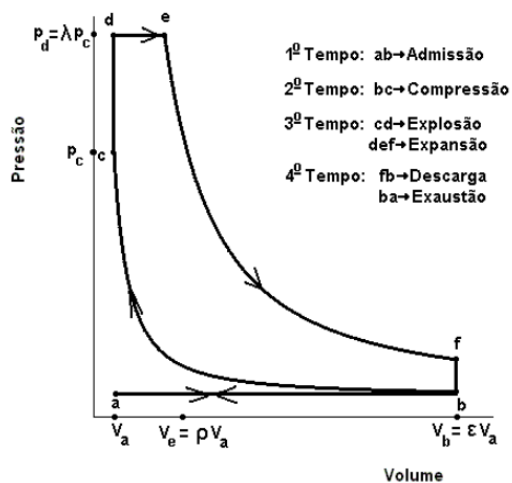


Fonte: Simplo (2020).

- **Pistão:** componente responsável pelo movimento dentro do cilindro, convertendo a energia da combustão em trabalho mecânico.
- **Biela:** conecta o pistão ao virabrequim, transformando o movimento linear do pistão em movimento rotacional.
- **Virabrequim:** eixo que converte o movimento linear da biela em movimento rotativo, transmitido ao sistema de tração do veículo.
- **Válvula de admissão:** permite a entrada da mistura de ar e combustível no cilindro.
- **Vela de ignição:** dispositivo que gera a faísca elétrica para inflamar a mistura comprimida de ar e combustível.
- **Válvula de escape:** controla a liberação dos gases de combustão.
- **Duto de admissão:** canal por onde o ar e o combustível entram no motor.
- **Escapamento:** sistema responsável pela eliminação dos gases resultantes da combustão.

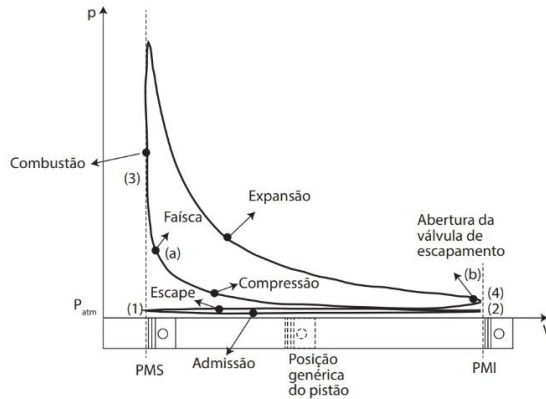
Sendo assim, o ciclo de Otto e suas quatro fases, acontecem de forma coordenadas, seguindo o seguinte critério:

Figura 2 – Gráfico do funcionamento prático do ciclo Otto-Diesel (volume – pressão)



Fonte: Fernando Lang da Silveira (2008).

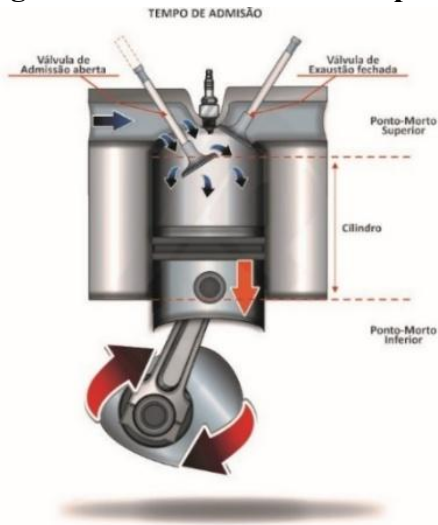
**Figura 3 – Diagrama detalhado do funcionamento do Ciclo Otto**



Fonte: Franco Brunneti (2018).

- **Admissão isobárica (1º tempo):** nesta fase, a válvula de admissão se abre, permitindo que a mistura de ar e combustível entre na câmara de combustão. Enquanto isso, o pistão se move para baixo, aumentando o volume da câmara. Esse processo ocorre sob pressão constante, criando as condições ideais para a combustão futura. Em termos gráficos, esse processo é representado pela fase ab → admissão (BRUNETI, 2018).

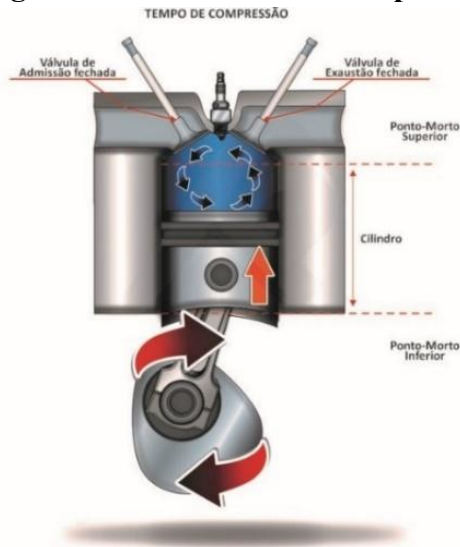
**Figura 4 – Funcionamento do pistão dentro do ciclo de admissão**



Fonte: Simplo (2020).

- **Compressão (2º tempo):** o ciclo da compressão adiabática, necessita que ambas as válvulas (de admissão e escape) fechadas, o pistão sobe novamente, comprimindo a mistura de ar e combustível. À medida que o volume diminui, a pressão aumenta significativamente, alcançando cerca de nove vezes a pressão atmosférica. Isso maximiza a eficiência da combustão que ocorrerá em seguida. No gráfico, essa fase é representada como bc → compressão (BRUNETI, 2018).

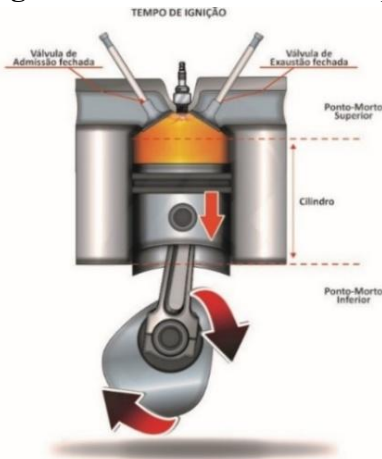
**Figura 5 – Funcionamento do pistão durante o ciclo de compressão**



Fonte: Simplo (2020).

- **Expansão adiabática (3º tempo):** quando a mistura está totalmente comprimida, a vela de ignição gera uma faísca que provoca a explosão da mistura de ar e combustível. Essa explosão gera uma grande quantidade de energia térmica, que é convertida em trabalho à medida que o pistão é empurrado violentamente para baixo. Esse movimento aumenta o volume do cilindro e cria o movimento rotacional necessário para o funcionamento do motor. No gráfico, esse processo é dividido entre a  $cd \rightarrow$  explosão e a  $de \rightarrow$  expansão (BRUNETI, 2018).

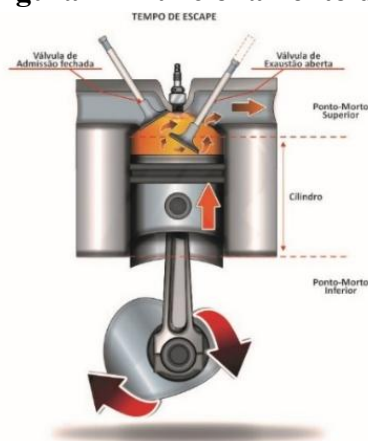
**Figura 6- Funcionamento do pistão durante o ciclo de expansão**



Fonte: Simplo (2020).

- **Exaustão isobárica (4º tempo):** finalmente, o pistão sobe novamente, mas desta vez a válvula de escape se abre, permitindo que os gases resultantes da combustão sejam expelidos do cilindro. O sistema resfria à medida que o pistão expulsa os resíduos da combustão pelo escapamento, preparando o motor para reiniciar o ciclo. No gráfico, esse processo é representado por  $fb \rightarrow$  descarga e  $ba \rightarrow$  exaustão (BRUNETI, 2018).

**Figura 7 – Funcionamento do Pistão durante o ciclo de escape**



Fonte: Simplo (2020).

Apesar do ciclo de Otto ter sido criado no século XIX, ele ainda é a fundação para diversos motores de combustão interna contemporâneos. Ao longo do tempo, avanços tecnológicos como a injeção eletrônica de combustível e o controle de ignição melhoraram a eficiência e o rendimento desses motores, tornando-os mais econômicos e sustentáveis. Essas inovações, aliadas à confiança intrínseca ao projeto original, mantêm o ciclo de Otto em alta demanda, mesmo com o avanço dos motores elétricos.

## 2.2. Outros ciclos importantes

Depois do ciclo Otto, que estabeleceu os fundamentos para a combustão interna, outros ciclos foram criados com a finalidade de melhorar a eficiência energética e o rendimento em diversas aplicações. Dentre eles, o ciclo Diesel sobressaiu-se pela sua durabilidade e economia de combustível, sendo frequentemente empregado em veículos de grande porte.

O motor desenvolvido por Rudolf Diesel<sup>4</sup> demonstrou uma eficiência consideravelmente superior à dos motores de ciclo Otto, principalmente em usos industriais e comerciais. Essa eficácia é devida à sua maior taxa de compressão e a habilidade de trabalhar com combustíveis mais econômicos, como o Diesel, o que o torna perfeito para necessidades de alta potência e longa duração.

Em contrapartida, o ciclo Atkinson<sup>5</sup> foi criado com o objetivo de aumentar a eficiência energética, incorporando inovações que diminuíram as perdas térmicas e as emissões. Este ciclo teve sua aplicação principal em motores híbridos, onde seu *design* exclusivo favorece uma economia de combustível maior sem prejudicar o desempenho.

A seguir, detalharemos esses ciclos fundamentais, explorando suas características e impactos na evolução dos motores.

<sup>4</sup> Rudolf Diesel: na cidade de Paris, França, no dia 18 de março de 1858, nasceu Rudolf Diesel. Descendente de alemães, este engenheiro e inventor dedicou sua vida à criação e melhoria de tecnologias focadas na eficiência e custo-benefício, contribuindo significativamente para o avanço da indústria, consolidando assim sua vida na engenharia e o progresso da industrial.

<sup>5</sup> James Atkinson: no ano de 1846, em Lancashire, Inglaterra, um engenheiro que deixaria seu nome na história ao aprimorar o ciclo Otto. Descendente de uma família de engenheiros, ele se sobressaiu ao reformular o ciclo, implementando aprimoramentos que aumentaram sua eficácia e utilização. Devido ao seu impacto, ele se tornou o primeiro estrangeiro a ser agraciado com a prestigiosa Medalha John Scott Legacy, entregue na cidade de Filadélfia, nos Estados Unidos, após apresentar sua inovação. Em 1914, aos 67 anos, ele veio a falecer, deixando um legado duradouro na engenharia e na tecnologia dos motores.

### 2.2.1. Ciclo Diesel

Em 1897, Rudolf Diesel apresentou seu protótipo de motor de ignição por compressão, que viria a revolucionar ainda mais a indústria automotiva e de energia. Os motores a Diesel, apesar de compartilharem o princípio básico de funcionamento dos motores de ciclo Otto, possuem características únicas que os tornam especialmente adequados para veículos e máquinas de grande porte. Um exemplo disso, é a não utilização da uma vela de ignição para iniciar a combustão, mas sim a compressão do ar dentro do cilindro, que atinge uma temperatura tão alta que inflama o combustível injetado.

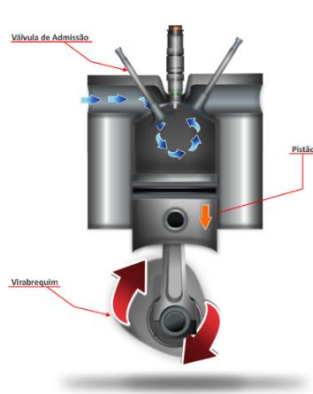
O ciclo do motor a Diesel é composto por quatro tempos: admissão, compressão, combustão e exaustão. Cada um desses tempos é essencial para o funcionamento e maximização de desempenho do motor, conforme detalhado a seguir:

- **Admissão:** a fase de admissão inicia o ciclo do motor a Diesel. Durante este estágio, o pistão se move do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), criando um vácuo parcial que possibilita a entrada de ar no cilindro. Neste movimento, a válvula de admissão se mantém aberta, enquanto a válvula de exaustão se fecha, assegurando o fluxo correto (SENAI-SP, 2018).

Ao contrário dos motores a gasolina, que introduzem a combinação de ar e combustível neste estágio, nos motores a Diesel apenas o ar é introduzido no cilindro. Isso proporciona um fluxo constante e uniforme de ar, essencial para a eficiência do processo.

Além disso, essa abordagem permite um controle mais preciso da combustão, que ocorre pela dosagem do combustível injetado em momentos específicos. Essa característica é um dos principais diferenciais do motor a Diesel, favorecendo sua robustez e eficiência energética.

**Figura 8 – Funcionamento do pistão no ciclo de admissão**



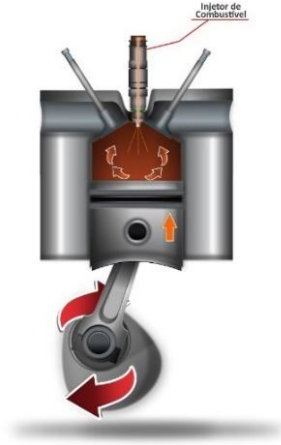
Fonte: Simplo (2022).

- **Compressão:** ao fechar as válvulas de entrada e saída, o pistão volta ao PMS, comprimindo o ar no cilindro. Neste procedimento, a alta relação de compressão (cerca de 18:1) resulta em temperaturas próximas a 800 °C e a pressão atinja valores próximas a 45 kgf/cm<sup>2</sup> (DORSEY ALFRED LYON, 1918).

A característica fundamental do motor a Diesel é que essa compressão do ar puro gera uma temperatura adequada para a combustão do combustível, dispensando a utilização de uma vela de ignição, como acontece no ciclo Otto. No término do

processo de compressão, o bico de injeção lança o combustível diretamente na câmara, criando uma névoa que se inflama naturalmente ao entrar em contato com o ar superaquecido, dando início à combustão.

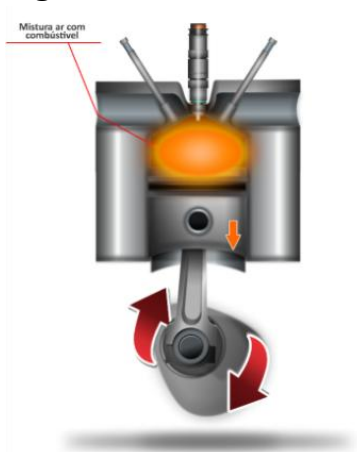
**Figura 9 – Funcionamento do pistão no ciclo de admissão**



Fonte: Simplo (2022).

- **Expansão:** depois de iniciar a combustão do combustível, os gases produzidos se expandem rapidamente, aumentando a pressão no interior do cilindro. Essa dilatação impulsiona o pistão a descer até o ponto morto inferior (PMI), finalizando o ciclo de trabalho mecânico (SENAI-SP, 2018). Esta fase tem a função de transformar a energia térmica produzida na combustão em energia mecânica. A biela transmite o movimento do pistão ao virabrequim, que por sua vez produz o torque necessário para mover o carro. As válvulas de admissão e exaustão permanecem fechadas durante o processo de expansão. Isso assegura que toda a pressão dos gases seja utilizada na geração de energia, evitando desperdícios desnecessários.

**Figura 10 – Funcionamento do pistão durante o processo de expansão**



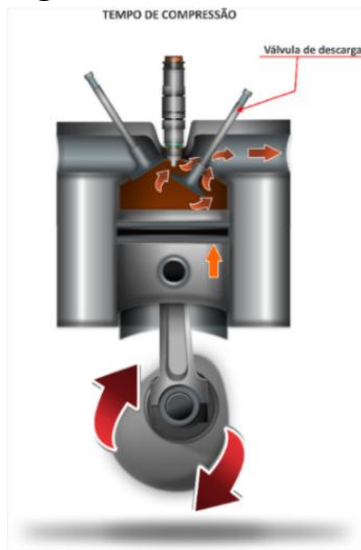
Fonte: Simplo (2022).

- **Descarga:** no término do ciclo, o pistão volta ao ponto morto superior (PMS), empurrando os gases de combustão que sobraram para fora do cilindro. Este procedimento acontece quando a válvula de descarga está aberta, possibilitando a eliminação dos detritos.

Ao mesmo tempo, a válvula de entrada se mantém fechada, impedindo a entrada de ar fresco até que o pistão comece a próxima fase de admissão. Este controle é crucial para assegurar a operação correta do motor.

É crucial eliminar completamente os gases de combustão para que o ciclo subsequente inicie com ar puro, mantendo a eficácia e eficiência do processo de combustão (DORSEY ALFRED LYON, 1918).

**Figura 11 – Funcionamento do pistão durante o ciclo de descarga**



Fonte: Simplo (2022).

Esta sequência, que aparenta ser simples, é apoiada por uma variedade de componentes sólidos e materiais que resistem às elevadas pressões e temperaturas envolvidas. O motor a Diesel requer componentes reforçados, como pistões e virabrequins, devido às elevadas cargas produzidas durante o ciclo. Todavia, a precisão dos sistemas de injeção e controle de combustão é crucial para prevenir pré-ignição, diminuição de potência e desgaste antecipado.

Por causa de sua forma e eficácia, os motores a Diesel são frequentemente empregados em aplicações que requerem força e longa durabilidade. A habilidade de gerar um grande volume de torque em baixas rotações torna o motor a Diesel perfeito para veículos de grande porte, que precisam de potência para carregar cargas pesadas e viajar longas distâncias.

No entanto, com o objetivo de aumentar a eficiência e diminuir a emissão de poluentes, novas tecnologias estão sendo implementadas, tais como a utilização de turbocompressores, sistemas de tratamento de gases e a implementação do bioDiesel, um combustível ecológico produzido a partir de óleos vegetais e gorduras de animais. Este progresso procura harmonizar a força e a potência dos motores Diesel com um impacto ambiental mais responsável, auxiliando na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes.

### 2.2.2. O ciclo Atkinson

Em 1882, James Atkinson criou o ciclo Atkinson como alternativa ao ciclo Otto, que predominava nos motores de combustão interna. O principal objetivo, era melhorar a eficiência

energética, criando um motor que utilizasse o combustível de maneira mais eficaz, diminuindo as perdas térmicas e, conseqüentemente, as emissões de poluentes.

Ao contrário do ciclo Otto, que se concentra na potência gerada, o ciclo Atkinson foi concebido com um único objetivo: expandir a trajetória de crescimento. Esta característica possibilita um uso mais eficiente da energia produzida pela combustão, levando a um uso mais eficiente do combustível.

O ciclo Atkinson é caracterizado pela relação entre os tempos de compressão e expansão, favorecendo a transformação da energia química do combustível em energia mecânica. Na primeira versão do ciclo, um mecanismo regulava a movimentação do pistão para atingir a proporção ideal de compressão e expansão. Apesar de eficiente, essa configuração complicava sua aplicação em grande escala.

Com o progresso tecnológico, a complexidade mecânica deu lugar ao controle eletrônico das válvulas, simplificando a implementação do ciclo Atkinson nos motores modernos.

- **Compressão isentrópica:** O ciclo termodinâmico começa com a fase de compressão. Durante este estágio, o pistão se desloca do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS), comprimindo a combinação de ar e combustível na câmara de combustão. Este movimento diminui o volume da câmara, aumentando a pressão e a temperatura do gás, ajustando a composição para a ignição.

A compressão é adiabática, o que significa que não ocorre troca de calor com o meio ambiente. Isso implica que toda a energia investida no gás leva ao aumento da sua energia interna, elevando a sua temperatura. A compressão isentrópica se distingue pela falta de perda ou ganho de energia externa, preservando a entropia do sistema inalterada.

Uma maior taxa de compressão geralmente resulta em maior eficiência térmica, pois permite que o motor gere mais trabalho útil com o mesmo volume de combustível.

- **Compressão isocórica:** o pistão alcança o PMS e permanece temporariamente imóvel. Neste instante, a combinação de ar e combustível é acesa, levando a uma combustão rápida que libera uma grande quantidade de energia térmica. A expressão isocórica indica que esse processo se dá a volume constante. Dito de outra forma, durante a combustão, o volume da câmara de combustão permanece inalterado, porém a pressão e a temperatura sobem rapidamente devido à liberação de energia química do combustível.

A compressão isocórica é crucial para garantir que a máxima quantidade de energia seja disponibilizada para a fase de expansão subsequente, onde será convertida em trabalho mecânico.

- **Expansão isentrópica:** Depois de serem queimados, os gases sob alta pressão e temperatura se dilatam, obrigando o pistão a se deslocar do PMS para o PMI. Este movimento é chamado de curso de potência do motor, no qual a energia interna do gás é transformada em energia mecânica. Este processo, assim como a compressão, é isentrópico, pois se dá de maneira adiabática, sem transferência de calor para o ambiente externo.

A expansão possibilita o uso da energia liberada durante a combustão para impulsionar o pistão, produzindo a força necessária para mover o virabrequim e, conseqüentemente, as rodas do carro. No ciclo Atkinson, essa taxa de expansão é maior que a taxa de compressão, permitindo que o motor extraia mais trabalho útil de cada ciclo e resultando em maior eficiência, conseqüentemente, o tempo de expansão é superior ao de compressão, o que otimiza a utilização da energia dos gases e diminui as perdas térmicas.

- **Exaustão Isobárica:** A exaustão é a etapa final do ciclo, onde os gases resultantes da combustão são expulsos para fora da câmara de combustão. O pistão se desloca do PMI para o PMS durante o processo de exaustão, empurrando os gases para fora pela válvula de escape aberta.

Este procedimento se dá de forma isobárica, isto é, a pressão se mantém inalterada durante a eliminação dos gases. Para este processo, é propositalmente diminuída a pressão ao término do impulso de potência para se assemelhar à pressão atmosférica, o que facilita a abertura da válvula de escape e reduz o esforço necessário para expulsar os gases. Isso se distingue do ciclo Otto, no qual a pressão interna no término da expansão pode ser mais elevada, ocasionando perdas energéticas durante o processo de exaustão.

Em suma, o ciclo Otto convencional tende a encerrar a expansão com uma pressão residual elevada, enquanto o ciclo Atkinson se esforça para que essa pressão seja a mais baixa possível, reduzindo o desperdício de energia e maximizando a utilização do trabalho gerado no percurso de potência.

Nos motores modernos, a adaptação do ciclo Atkinson ocorre através do controle das válvulas. Uma estratégia comum é estender a abertura das válvulas de entrada no começo do processo de compressão. Isso possibilita o retorno de uma parte da mistura ar-combustível para o coletor de admissão, diminuindo o volume real de ar comprimido e, conseqüentemente, reduzindo o esforço do motor durante a compressão.

Esta estratégia possibilita que o motor gere mais trabalho durante a fase de expansão do que gasta durante a compressão, levando a um aumento na eficiência térmica. Contudo, isso resulta em uma potência específica reduzida, o que o torna perfeito para veículos híbridos, onde um motor elétrico pode proporcionar o torque extra necessário em situações de alta necessidade.

## 2.3. Motores Elétricos

Os motores elétricos estão revolucionando a indústria automobilística, oferecendo uma alternativa mais sustentável aos motores de combustão interna. Esses motores funcionam convertendo energia elétrica, geralmente armazenada em baterias, em energia mecânica para movimentar o veículo.

Uma das principais vantagens dos motores elétricos é a eficiência energética. Eles conseguem converter uma maior porcentagem da energia armazenada em movimento, reduzindo perdas e aumentando a autonomia dos veículos. Além disso, são mais silenciosos e têm menos peças móveis, o que diminui a necessidade de manutenção.

A popularização dos carros elétricos também está impulsionando o desenvolvimento de infraestrutura de recarga e a pesquisa em baterias, visando aumentar a capacidade e a rapidez do carregamento. Com a crescente preocupação ambiental e a busca por alternativas aos combustíveis fósseis, os motores elétricos emergem como uma solução promissora para o futuro da mobilidade.

### 2.3.1. Funcionamento dos Motores Elétricos

Os motores elétricos convertem energia elétrica em energia mecânica através da interação de campos magnéticos. Quando a corrente elétrica flui pelas bobinas do motor, um campo magnético é gerado, resultando na rotação do rotor e, conseqüentemente, na movimentação do veículo. Essa eficiência na conversão de energia é uma das principais características que distingue os motores elétricos dos motores de combustão interna.

### 2.3.2. Tipos de Motores Elétricos

Os principais tipos de motores elétricos utilizados em veículos são:

- **Motor de Indução (Assíncrono):** Este é o tipo mais comum em carros elétricos. Ele opera com corrente alternada (CA) e é conhecido por sua robustez e eficiência. Por não ter escovas, requer menos manutenção e oferece um desempenho consistente;
- **Motor Síncrono:** Utiliza ímãs permanentes e é projetado para operar a uma velocidade constante, sincronizada com a frequência da corrente elétrica. É ideal para aplicações que exigem alto desempenho e eficiência em acelerações rápidas;
- **Motor de Fluxo Axial:** Com um design mais compacto, permite uma maior densidade de potência, resultando em veículos mais leves e ágeis. Esse tipo de motor está ganhando popularidade em modelos mais recentes devido à sua eficiência e design inovador.

### 2.3.3. Vantagens dos Motores Elétricos,

Os motores elétricos oferecem diversas vantagens em comparação aos motores de combustão interna:

- **Eficiência Energética:** Podem converter até 90% da energia elétrica em movimento, em comparação com cerca de 20-30% nos motores a gasolina;
- **Menor Manutenção:** Com menos partes móveis e sem o sistema de combustão, os motores elétricos têm uma vida útil mais longa e exigem menos manutenção;
- **Sustentabilidade:** A operação sem emissões diretas de poluentes contribui para a redução da pegada de carbono e melhora a qualidade do ar.

### 2.3.4. Desafios

Apesar das suas vantagens, os motores elétricos enfrentam alguns desafios:

- **Autonomia:** A capacidade das baterias ainda é uma limitação significativa. Embora a tecnologia esteja avançando, a autonomia dos veículos elétricos muitas vezes não atende às necessidades de todos os consumidores;
- **Infraestrutura de Recarga:** A falta de uma rede ampla e eficiente de estações de recarga pode desencorajar potenciais compradores de veículos elétricos;
- **Custo das Baterias:** O custo elevado das baterias ainda representa uma barreira para a adoção em massa de veículos elétricos.

### 2.3.5. Ciclos Elétricos

Os motores de veículos elétricos operam através de ciclos específicos que garantem sua eficiência e desempenho. Aqui estão os principais ciclos envolvidos no funcionamento dos motores de veículos elétricos:

- **Ciclo de Alimentação:**

Descrição: O motor recebe energia elétrica da bateria do veículo, que pode ser de íon de lítio ou outra tecnologia. A quantidade e a qualidade da energia fornecida são essenciais para o desempenho do motor.

Importância: Um fornecimento estável e controlado de energia é crucial para o funcionamento eficiente do motor.

- **Ciclo de Magnetização:**

Descrição: A corrente elétrica flui através das bobinas do motor, gerando um campo magnético. Esse campo é essencial para a operação do motor, pois cria a força que move o rotor.

Importância: O campo magnético bem definido permite a conversão eficiente da energia elétrica em energia mecânica.

- **Ciclo de Rotação:**

Descrição: A interação entre o campo magnético e o rotor resulta em movimento rotacional. A direção da corrente elétrica determina a direção do movimento.

Importância: Este ciclo é o principal responsável pela geração de força que impulsiona o veículo.

- **Ciclo de Controle:**

Descrição: Um sistema de controle eletrônico, como um inversor, ajusta a frequência e a amplitude da corrente que alimenta o motor, permitindo variações na velocidade e torque.

Importância: O controle preciso é essencial para proporcionar uma condução suave e responsável, especialmente em situações de aceleração e frenagem.

- **Ciclo de Recuperação de Energia:**

Descrição: Durante a desaceleração ou frenagem, o motor pode atuar como um gerador, convertendo energia cinética de volta em energia elétrica, que é então armazenada na bateria.

Importância: Esse ciclo melhora a eficiência do veículo, prolongando a autonomia ao recuperar energia que, de outra forma, seria perdida.

- **Ciclo de Refrigeração:**

Descrição: Durante a operação, os motores elétricos geram calor. Sistemas de refrigeração, como ventiladores ou sistemas líquidos, ajudam a dissipar esse calor.

Importância: A refrigeração adequada é essencial para evitar o superaquecimento e garantir a longevidade e eficiência do motor.

- **Ciclo de Parada:**

Descrição: Quando o veículo é desligado, o motor para gradualmente. O sistema de controle garante que essa parada seja suave para evitar danos.

Importância: Um desligamento controlado ajuda a manter a integridade do motor e dos sistemas elétricos.

Esses ciclos são fundamentais para entender como os motores de veículos elétricos funcionam e como eles se diferenciam dos motores a combustão, além de destacar as vantagens da tecnologia elétrica na mobilidade moderna.

## 2.4. Os impactos ambientais e sua relação com a Eficiência

A produção em larga escala de veículos teve um papel crucial na popularização da tecnologia para uma ampla parcela da sociedade. Contudo, o crescimento exponencial na frota de veículos resultou em graves impactos ambientais, como a elevação da poluição do ar e a intensificação do efeito estufa e do aquecimento global. De acordo com informações divulgadas pela Ecoa Uol, juntamente do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA)<sup>6</sup>, o segmento de transportes contribui com aproximadamente 14% das emissões globais de Gases de Efeito Es-

---

<sup>6</sup> VICENZO, Giacomo. **Qual o impacto de ter um carro para o aquecimento global?**. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/ecoa/ultimas-noticias/2021/11/27/qual-o-impacto-de-ter-um-carro-para-o-aquecimento-global.htm>>. Acesso em: 03 nov. 2022.

tufa – GEE. Para ilustrar, um veículo comum produz cerca de 1,703 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente. Para compensar esse efeito, cada condutor teria que plantar, em média, cinco árvores por ano para atenuar parcialmente as emissões provenientes do uso do seu automóvel.

#### 2.4.1. Desafios de Consumo versus Aumento de Desempenho

O debate sobre a eficiência e o desempenho dos veículos a combustão e elétricos vem ganhando destaque nos últimos anos, especialmente quanto a necessidade de soluções sustentáveis e as crescentes preocupações ambientais. Com isso, a comparação entre os veículos a combustão e elétricos revela uma série de desafios. A escolha entre um e outro, depende de uma série de fatores, necessidades de mobilidade, preocupações ambientais e preferências pessoais.

Conforme a tecnologia avança e as prioridades mudam, o cenário automobilístico se adapta, prometendo um futuro em que o desempenho e a eficiência possam coexistir de maneira sustentável.

Os veículos a combustão são conhecidos por seu desempenho robusto, principalmente em termos de potência e aceleração, porém, essa performance é acompanhada de desafios significativos na questão de consumo de combustível e emissões de poluentes.

Sendo assim, os desafios de consumo versus aumento de desempenho dos veículos a combustão envolvem uma série de escolhas e compromissos que as montadoras enfrentam. Aqui estão alguns dos principais pontos:

- **Manutenção:** para os veículos a combustão, a manutenção regular é essencial para garantir a eficiência. Inspeções de escapamento, troca de óleo e cuidados com o motor são fundamentais. Ignorar esses aspectos pode levar ao aumento no consumo, queda de desempenho e aumento de emissões de poluentes;
- **Emissões:** o aumento do desempenho, como acelerações rápidas, tende a ter maior consumo de combustível, gerando mais emissões de gases poluentes. Por tanto, para atender as demandas por desempenho, os veículos a combustão, frequentemente se tornam menos sustentáveis;
- **Normas de Emissões:** as regulamentações ambientais exigem que os veículos a combustão atendam a padrões de emissão cada vez mais rigorosos. Podendo limitar as opções de desempenho sem comprometer o consumo;
- **Sustentabilidade:** com o crescente foco na sustentabilidade, há pressão para que os fabricantes reduzam o consumo de combustível e as emissões de poluentes dos veículos produzidos, o que pode estar em conflito com o desejo de aumentar o desempenho.

Esses e alguns outros fatores, criam um cenário complexo onde as montadoras devem inovar e encontrar soluções que atendam tanto às expectativas dos consumidores quanto às exigências ambientais.

Quanto aos veículos elétricos, eles têm ganhado espaço no mercado, sendo uma alternativa viável, eficiente e sustentável. Tendo um modelo baseado em baterias, eles oferecem distintas vantagens.

Os desafios de consumo versus aumento de desempenho enfrentados pelos veículos elétricos também envolvem diversos pontos importantes, sendo alguns deles:

- **Capacidade da Bateria:** aumentar o desempenho, como aceleração e velocidade, geralmente exige baterias maiores ou mais potentes, podendo aumentar o peso e reduzir a eficiência do veículo;

- **Autonomia:** a busca por maior desempenho pode comprometer a autonomia. Veículos que priorizam aceleração rápida podem consumir mais energia, limitando a distância que podem percorrer com uma única carga;
- **Desafios de Autonomia:** apesar das vantagens, a autonomia dos veículos elétricos e a infraestrutura de recarga causam preocupações para os consumidores. O desenvolvimento contínuo de baterias mais eficientes e a expansão da rede de postos de recarga são cruciais para aumentar a adoção destes modelos de veículos por parte dos consumidores.

Esses fatores exigem que os fabricantes de veículos elétricos desenvolvam soluções inovadoras que atendam às demandas de desempenho enquanto maximizam a eficiência e a sustentabilidade.

#### 2.4.2. Comparação e Perspectivas Futuras

A comparação entre os veículos a combustão e elétricos, tem um panorama de escolhas entre desempenho, custo e sustentabilidade. Apesar dos veículos a combustão oferecerem desempenho consolidado, eles enfrentam desafios na questão de eficiência e impacto ambiental. No outro lado, os veículos elétricos, com sua eficiência superior e menor impacto ambiental, necessitam superar barreiras como autonomia e infraestrutura.

Com a necessidade de soluções de transportes sustentáveis se tornando cada vez mais urgente, os veículos a combustão têm um impacto ambiental significativo, enquanto isso, a produção de baterias para veículos elétricos levanta questões sobre a extração de matérias-primas e sua sustentabilidade.

Ambos os segmentos estão em constante evolução. A inovação tecnológica continua a melhorar a eficiência, o desempenho e a experiência do usuário, indicando que o futuro do transporte pode ser mais diversificado do que nunca.

#### 2.4.3. A eficiência e as metas de redução de CO<sub>2</sub>

A eficiência dos veículos, tanto a combustão quanto aos carros elétricos, é crucial para atingir as metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Essa relação se desdobra em diversos aspectos.

Primeiro, a eficiência energética é um fator crucial. Nos veículos a combustão, apenas uma fração da energia do combustível é convertida em movimento, com taxas de conversão que variam de 20 a 30%. Para superar essa limitação, inovações como a injeção direta e a turboalimentação têm sido desenvolvidas, visando melhorar a eficiência e reduzir as emissões de dióxido de carbono por quilômetro percorrido.

Em contraste, os veículos elétricos oferecem uma conversão de energia significativamente mais eficaz. Cerca de 60% da energia da bateria é convertida em movimento, o que resulta em emissões consideravelmente menores durante seu uso, contribuindo para uma mobilidade mais sustentável.

Outro aspecto importante é a limpeza da matriz elétrica. A eficiência dos veículos elétricos está diretamente ligada à origem da eletricidade que os alimenta. Quando a eletricidade é gerada a partir de fontes renováveis, as emissões associadas à recarga desses veículos diminuem, favorecendo as metas de redução dos gases de efeito estufa.

As regulações sobre emissões também têm um impacto significativo. Muitos países implementam normas que limitam as emissões de veículos a combustão, o que incentiva o de-

envolvimento de motores mais eficientes e, conseqüentemente, a diminuição das emissões diretas. Essas regulamentações não apenas beneficiam os veículos a combustão, mas também promovem avanços tecnológicos que favorecem os elétricos.

A pesquisa em tecnologias de captura de carbono representa outra frente na mitigação das emissões dos veículos a combustão. Apesar de promissoras, essas tecnologias ainda enfrentam desafios práticos e financeiros para sua implementação em larga escala.

Os incentivos governamentais são vitais para essa transição. Programas que oferecem subsídios e isenções fiscais para a aquisição de veículos elétricos têm um papel fundamental na promoção da adoção desses modelos, o que, por sua vez, contribui para um sistema de transporte mais eficiente e menos poluente.

A mudança nas expectativas dos consumidores também é relevante. A crescente preocupação com questões ambientais tem levado muitos a preferirem veículos mais sustentáveis, acelerando a transição para uma frota mais limpa.

Por fim, a análise do ciclo de vida dos veículos deve ser considerada. Embora a produção de baterias para veículos elétricos possa gerar emissões, o impacto global desses veículos em termos de poluição tende a ser menor ao longo do tempo.

Em síntese, a eficiência dos veículos, sejam eles a combustão ou elétricos, é fundamental para o cumprimento das metas de reduzir o aquecimento global. Com o avanço tecnológico e políticas mais rigorosas, a transição para uma frota mais eficiente e sustentável é cada vez mais viável, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

## 2.5. Eficiência energética

Há algumas décadas a sustentabilidade vem ganhando espaço em diversas áreas da indústria, visando reduzir os impactos ambientais causados pela produção, consumo e ações humanas. Com este objetivo, a eficiência energética ganhou cada vez mais notoriedade dentro de todos os segmentos da indústria, incluindo o setor automobilístico.

Visando aumentar a eficiência energética dos veículos e conseqüentemente reduzir os impactos ambientais gerados, tanto pela emissão de gases do efeito estufa, quanto pelo alto consumo de combustíveis fósseis, foram criadas diversas tecnologias novas, como por exemplo a injeção eletrônica, que passou a substituir os carburadores nos carros produzidos no Brasil a partir da década de 1990, sendo responsável pelo controle da alimentação de combustível para o motor.

McQuiston, Parker e Spitler (2006) definem a eficiência energética como "a relação entre o trabalho realizado por um sistema e a energia fornecida a ele, podendo ser aumentada pela redução das perdas de energia no processo de conversão", desta forma entende-se que a melhor forma de aumentar a eficiência de um motor é reduzir as perdas geradas por atrito, dissipação térmica, e fuga de corrente elétrica no caso de motores elétricos.

Dentro da engenharia, a eficiência, também conhecida como rendimento, pode ser entendida como a relação entre a energia consumida e o trabalho realizado por um sistema:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (1)$$

Onde:

$\eta$ : Representa o rendimento;

$P_{saída}$ : É o trabalho realizado ou a potência de saída;

$P_{entrada}$ : É a energia fornecida inicialmente para o sistema.

Este conceito de rendimento, se aplica a grande maioria dos sistemas, tanto térmicos, quanto mecânicos e até motores elétricos, apesar de sofrer algumas variações nos termos utilizados.

## 2.6. Motores de ciclo Otto

Os motores de ciclo Otto são motores de combustão interna (MCI), baseados em um funcionamento de 4 tempos, admissão, compressão, combustão e exaustão, que utilizam de uma mistura de ar e combustível para gerar trabalho mecânico.

Por ser um modelo de motor que realiza tanto processos mecânicos quanto térmicos, ele apresenta uma perda muito grande de eficiência durante os processos, tanto por atrito quanto pela dissipação de energia em forma de calor, o que resulta na necessidade de um sistema de arrefecimento para evitar que ele supraqueça e seja danificado.

Heywood (1988) afirma que as perdas por atrito afetam diretamente a potência e o consumo de combustível de um veículo. Diz ainda que o que diferencia um bom projeto de um projeto “razoável” é a diferença entre estas perdas. Desta forma, é importante que entendamos os fatores que causam estas perdas por atrito.

Silva & Martinelli (2010) afirmam que “o atrito é um fenômeno resistivo e que se opõe ao sentido do movimento, dos componentes do motor, transformando parte da energia destinada à potência de eixo em energia térmica dissipada”. Ele surge do contato entre os diversos componentes do sistema como engrenagens, virabrequim e válvulas. Todavia, calcular com precisão o atrito não é uma tarefa fácil, e por este motivo, geralmente, é utilizado um dinamômetro para medir uma estimativa chamada trabalho ou potência ( $W_{at}$ ) de atrito, recriando com exatidão as condições de funcionamento do motor.

Uma indicação da potência bruta indicada ( $W_{bi}$ ) pode ser representada através da soma da potência no freio (dinamômetro) com a potência de atrito ( $W_{at}$ ).

$$W_{bi} = W_d - W_{at} \quad (1)$$

Onde,

$W_{bi}$  = Potência indicada;

$W_d$  = Potência medida no dinamômetro;

$W_{at}$  = Potência de atrito.

A relação entre potência medida no dinamômetro e a potência indicada é chamada de eficiência mecânica (HEYWOOD, 1988):

$$\eta_m = \frac{W_d}{W_{bi}} = 1 - \frac{W_{at}}{W_{bi}} \quad (2)$$

Onde,

$\eta_m$  = Eficiência mecânica do motor.

Além do atrito, outra perda importante em MCI é a térmica, relacionada ao processo de queima de combustível para o funcionamento do motor. Para calcularmos a eficiência térmica de um motor utilizamos a seguinte equação (ÇENGEL e BOLES, 2006):

$$\eta_c = \frac{Q}{PC} \quad (3)$$

Onde,

$\eta_c$ : Representa a eficiência da combustão;

Q: Representa a quantidade de calor liberado durante a combustão;

PC: Representa o poder calorífico do combustível.

A eficiência térmica de um MCI de ciclo Otto depende de alguns outros fatores importantes relacionados ao funcionamento do motor como um todo, sendo as principais:

- **Composição do Combustível:** Diferentes combustíveis têm diferentes poderes caloríficos, que afetam a quantidade de energia disponível para a combustão.
- **Mistura Ar Combustível:** A proporção correta de ar e combustível é crucial para uma combustão eficiente. Misturas pobres ou ricas podem resultar em combustão incompleta e maior dissipação de calor.
- **Taxa de Compressão:** aumentar a taxa de compressão, aumentar a eficiência térmica, pois permite que o motor extraia mais energia do combustível. No entanto, isso também pode aumentar a tendência a batidas de pino.
- **Tecnologias de Injeção:** Sistemas de injeção de combustível mais avançados, como a injeção direta, permitem melhor controle sobre a quantidade e o timing do combustível injetado, otimizando a combustão.
- **Gestão de Calor:** Sistemas de arrefecimento eficazes e gerenciamento térmico são essenciais para minimizar as perdas de calor e evitar superaquecimento do motor.
- **Qualidade da Combustão:** A eficiência da combustão depende da qualidade da ignição e da propagação da chama dentro do cilindro.

Melhorar a eficiência térmica é essencial não só para reduzir o consumo de combustível, mas também para diminuir a emissão de poluentes. Motores mais eficientes aproveitam melhor a energia disponível, resultando em menor emissão de gases como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e hidrocarbonetos não queimados.

Como citado acima, a eficiência da combustão tem grande influência do combustível utilizado, devido as diferenças na composição de cada um. Esta relação é denominada consumo específico, que segundo Heywood (1988) representa o quanto de eficiência apresenta um motor levando-se em consideração o combustível utilizado, e pode ser representada pela seguinte equação:

$$CE = \frac{m_f}{W} \quad (4)$$

Onde,

CE, representa o consumo específico de combustível (g/kWh)

$M_f$ , é a vazão mássica de combustível (g/h)

W, representa a potência em unidade de energia (kW)

Pode-se ainda, relacionar a eficiência da conversão de combustível em trabalho com o consumo específico através da seguinte equação (HEYWOOD, 1988):

$$\eta_1 = \frac{1}{CE \cdot PC} \quad (5)$$

Assim, facilitando a compreensão das reais diferenças de eficiência entre diferentes modelos de motores associados aos diferentes tipos de combustíveis, baseando-se na energia que cada um oferece e como ela é consumida.

## 2.7. Motores de Ciclo Diesel

Os MCI de ciclo Diesel, são muito similares aos de ciclo Otto, a principal diferença entre os ciclos está no estágio de admissão da mistura de ar e combustível no pistão. Os MCI de ciclo Otto admite uma mistura de ar e combustível juntos no pistão, que são pressurizados e a combustão é realizada através de uma faísca gerada pela vela de ignição, enquanto no ciclo Diesel o pistão pressuriza apenas o ar e a combustão é feita com a injeção do próprio combustível no ar pressurizado e quente (HEYWOOD, 1988).

Apesar de aparentar ser um modelo de motor mais simples por não utilizar as velas de ignição, os motores de ciclo Diesel são mais complexos, uma vez que necessitam de um mecanismo sofisticado e preciso para realizar a injeção do combustível dentro da câmara a pressões e temperaturas muito elevadas (HEYWOOD, 1988).

Outros pontos importantes a serem mencionados são a maior robustez necessária na construção dos componentes deste tipo de sistema para suportar as condições de operação, além do ruído gerado durante o funcionamento e os custos elevados de manutenção, em relação aos propulsores Otto, porém podem ser compensados pela maior eficiência energética obtida e vida útil (HEYWOOD, 1988).

## 2.8. Motores Elétricos

Como alternativa aos MCI surgiram os veículos elétricos que utilizam eletricidade ao invés de combustíveis como fonte de energia, reduzindo de forma drástica a emissão de gases, uma vez que não há queima de compostos químicos. Outro benefício importante dos veículos elétricos é a sua alta eficiência energética, podendo chegar até cerca de 90%, desta forma, mesmo que as baterias consigam armazenar uma quantidade proporcionalmente menor de energia que os combustíveis convencionais, a alta eficiência deste tipo de motor supre esta diferença e ainda supera os MCI.

Segundo Lovins (1976), os motores elétricos apresentam uma série de vantagens em termos de eficiência energética, pois transformam a energia elétrica diretamente em energia mecânica, com muito menos perdas por calor ou atrito. Além disso, eles são mais simples em termos de design, possuindo menos partes móveis e, conseqüentemente, menor necessidade de manutenção.

Quando se analisa a eficiência de um veículo elétrico, o primeiro passo é calcular a eficiência da bateria que é a principal fonte de energia neste caso. De acordo com Chen e Peng (2019), as baterias de íons de lítio, amplamente utilizadas em veículos elétricos, possuem uma eficiência de carga/descarga que varia entre 85% e 95%, dependendo das condições de operação, como temperatura e taxa de carga. A eficiência da bateria é calculada por:

$$\eta_{bateria} = \frac{\text{Energia útil entregue pela bateria}}{\text{Energia total recebida durante o carregamento}} \quad (6)$$

As perdas ocorrem principalmente devido ao efeito Joule e ao calor gerado durante o processo de carga e descarga (Dincer & Rosen, 2013). Mohan et al. (2003) afirma que a eficiência dos motores de ímãs permanentes utilizados nos veículos elétricos modernos apresenta

uma eficiência na faixa de 85% a 95%, dependendo das condições de operação. Essa eficiência pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\eta_{motor} = \frac{\text{Potência mecânica útil}}{\text{Potência elétrica de entrada}} \quad (7)$$

Entre as principais perdas neste sistema, têm-se as perdas por efeito joule, magnéticas e mecânicas (por atrito ou ventilação) (Boldea & Nasar, 2010).

Outro ponto a ser analisado é a eficiência na transmissão. Os veículos elétricos apresentam um sistema de transmissão bem mais simples do que os MCI convencionais, podendo, geralmente, ser direta ou de único estágio, o que reduz significativamente as perdas mecânicas. Gupta (2017) estima que a eficiência da transmissão em veículos elétricos modernos pode ser superior a 95%. A fórmula da eficiência da transmissão é:

$$\eta_{transmissão} = \frac{\text{Energia mecânica na roda}}{\text{Energia mecânica gerada pelo motor}} \quad (8)$$

E por fim, tendo as informações relacionadas a eficiência de cada conjunto do sistema, pode-se calcular a eficiência total do veículo, sendo ela o produto da eficiência dos conjuntos. Segundo Cengel e Boles (2006), a eficiência total pode ser calculada por:

$$\eta_{total} = \eta_{bateria} \times \eta_{motor} \times \eta_{transmissão} \times \eta_{auxiliares} \quad (9)$$

Utilizando deste método, é possível chegar a valores muito próximos do real, dependendo apenas da precisão das eficiências calculadas em cada conjunto e da utilização do veículo.

Dentre as novas tecnologias que este sistema apresenta, vale ressaltar a recuperação de energia por frenagem regenerativa, que converte parte da energia cinética durante a frenagem do automóvel em energia elétrica para recarregar a bateria, aumentando a durabilidade da bateria e autonomia do veículo. Ehsani et al. (2018) destacam que, dependendo das condições de condução, a regeneração pode recuperar até 30% da energia que, de outra forma, seria desperdiçada como calor nos freios tradicionais.

## 2.9. Veículos híbridos

Os veículos híbridos vêm sendo aprimorados como uma alternativa para unir os benefícios dos MCI e dos veículos elétricos, com a utilização de um motor elétrico como principal sistema de tração, pode utilizar o MCI como gerador para recarregar a bateria ou como auxílio quando o automóvel precisar uma potência extra. Ao utilizar um motor elétrico como principal fonte de potência, é possível reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera, além de ter um baixo ruído, contribuindo para a redução da poluição sonora também (Laís Cavagliano, 2020).

Outras vantagens apresentadas por este tipo de veículo é a alta autonomia se comparados aos veículos elétricos, além de existirem modelos Plug-in (recarregados diretamente na “tomada”) e convencionais, onde o motor a combustão é utilizado como gerador e ainda conta com o sistema de frenagem regenerativa para aumentar a durabilidade da bateria.

Ainda há muitos avanços possíveis para os veículos híbridos, mas para o deslocamento cotidiano dentro das cidades, ele se torna uma excelente opção, se beneficiando tanto da eficiência energética do motor elétrico quanto a autonomia gerada pelo MCI.

Há muitos modelos diferentes de motores híbridos e suas tecnologias podem variar bastante dependendo do fabricante, alguns podem utilizar o motor elétrico apenas em baixa rotação, enquanto outros podem utilizá-lo como auxílio quando o veículo precisa de potência máxima, e há ainda, como foi citado anteriormente, os que o utilizam como motor principal o tempo inteiro.

Segundo (SÁNCHEZ, 2012), a eficiência de um veículo híbrido pode variar dependendo da configuração em que a energia e o trabalho são divididos entre os motores, mas pode-se calcular a eficiência total do veículo da seguinte forma:

$$\eta_{total} = \frac{\eta_{comb} \times E_{comb} + \eta_{el} \times E_{el}}{E_{comb} + E_{el}} \quad (10)$$

Sendo,

$\eta_{total}$ , a eficiência total do sistema;

$\eta_{comb}$ , a eficiência do MCI;

$E_{comb}$ , a energia consumida pelo MCI;

$\eta_{el}$ , a eficiência do motor elétrico;

$E_{el}$ , a energia consumida pelo motor elétrico.

## 2.10. PBEV

Em novembro de 2008 foi lançado o PBVE (Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular), no Salão do automóvel, em São Paulo, pelo ministro do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Miguel Jorge, tendo por objetivo classificar os veículos leves por categoria, de acordo com sua eficiência energética e consumo, sendo “A” (mais eficientes) e “E” (menos eficientes), possibilitando aos consumidores compararem veículos de mesma categoria e fazerem escolhas de compra mais conscientes, gerando no mercado uma competitividade maior em relação a construção de veículos mais eficientes e menos poluentes.

De acordo com o INMETRO, os valores sobre eficiência e consumo são obtidos a partir de medições realizadas em laboratório, conforme os padrões da norma NBR 7024, que determina que os testes sejam feitos com o uso de combustíveis padrão brasileiro e adoção de ciclos de condução pré-estabelecidos.

Além disso, adotou-se fatores de ajuste para os valores obtidos, desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a partir de milhares de dados reais que estimam que cerca de 90% dos motoristas conseguem obter valores de consumo reais com variações de no máximo 20% em relação aos testes realizados em laboratório.

É importante enfatizar que não existe um modelo de medição perfeito que obterá valores de consumo exatos para todos os motoristas, devido aos diversos fatores que influenciam no consumo de combustível de cada veículo como forma de condução, tipo de estrada, frequência de congestionamentos nas estradas, utilização de acessórios como o ar-condicionado, calibração dos pneus, falta de manutenção, entre outros. Desta forma, resultados que contemplam 90% dos consumidores com uma variação de cerca 20% são significativamente precisos.

Atualmente, em 2024, estão inclusos no PBEV 856 modelos/versões de veículos de 36 marcas, sendo 132 modelos híbridos e 99 modelos elétricos. Esta grande variedade de modelos e veículos oferece ao consumidor, na maior parte das vezes, a facilidade de buscar exatamente o veículo que tem interesse para analisar com os demais modelos da mesma categoria.

### 3. METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem bibliográfica, fundamentada em materiais de apoio diversificados que forneceram a base teórica para o desenvolvimento e a análise crítica sobre motores a combustão e motores elétricos. Por seu caráter exploratório e descritivo, a metodologia buscou sistematizar as informações obtidas a partir de fontes documentais de alta qualidade, como livros técnicos, artigos científicos, relatórios e publicações de órgãos oficiais, permitindo uma análise abrangente sobre os ciclos termodinâmicos, eficiência energética, e impactos ambientais associados aos diferentes tipos de motores.

#### 3.1. Seleção dos Materiais de Apoio

Os materiais foram selecionados conforme os critérios de relevância e confiabilidade, priorizando fontes acadêmicas e técnicas que cobrissem aspectos históricos, tecnológicos e ambientais dos motores. A pesquisa incluiu:

- **Fontes Históricas e Biográficas:** utilizadas para contextualizar a evolução dos motores e suas principais inovações tecnológicas.
- **Fontes Técnicas sobre Ciclos de Motor:** o aprofundamento sobre ciclos Otto, Diesel e Atkinson foi possível com o uso de manuais e artigos especializados que detalham o funcionamento e a eficiência desses sistemas.
- **Estudos sobre Motores Elétricos:** documentos como relatórios e estudos de caso forneceram subsídios sobre a evolução e a viabilidade dos motores elétricos, abordando seus impactos ambientais e perspectivas de mercado.
- **Manuais Clássicos e Obras de Referência:** livros técnicos de autores consagrados foram essenciais para a fundamentação teórica sobre os motores de combustão interna.
- **Revistas e Sites especializados:** usados para obter atualizações sobre o estado atual das tecnologias e avanços recentes na indústria automotiva.

#### 3.2. Procedimento de Coleta e Validação das Informações

Com o tema definido, foi realizada uma revisão preliminar para entender tópicos fundamentais relacionados aos motores e à eficiência energética. Durante a coleta, aplicou-se uma análise rigorosa da qualidade e veracidade dos dados, comparando informações em pelo menos duas fontes distintas para garantir sua confiabilidade. A seleção priorizou publicações de autoria reconhecida e fontes institucionais, como artigos de periódicos indexados, conferências e manuais de órgãos oficiais, como INMETRO e ABNT, que também serviram como fontes normativas.

#### 3.3. Etapa de Escrita e Compilação dos Dados

A etapa de escrita organizou e integrou as informações coletadas, respeitando as normas acadêmicas de citação e formatação. O conteúdo foi desenvolvido com uma análise crítica constante, de modo a evitar distorções de informações e garantir a precisão dos dados apresentados. Esse processo visou assegurar a coerência e a clareza do texto, facilitando a compreensão dos tópicos abordados e sustentando as discussões sobre eficiência energética em motores.

### 3.4. Revisão e Finalização do Texto

Ao final da escrita, todo o material foi revisado para assegurar que atendia às normas acadêmicas e aos objetivos estabelecidos. A revisão abrangeu a verificação de coerência, qualidade e fluidez do texto, assegurando que o estudo refletisse com exatidão os objetivos da pesquisa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado anteriormente, as fórmulas utilizadas para o cálculo de eficiência energética em cada tipo de veículo dependem de diversas variáveis, sendo algumas delas obtidas apenas através de testes práticos, o que as torna de difícil acesso para o público em geral, desta forma, visando facilitar a comparação e o acesso aos dados relacionados a eficiência e consumo, serão utilizados como base as informações publicadas pelo INMETRO na 16ª edição do PBEV.

### 4.1. Comparativo entre modelos e motores segundo o PBEV

Considerando o tipo de propulsão, categoria e combustível, escolheu-se os modelos de veículos com as menores quantidades de consumo energético de quatro categorias diferentes (compacto, médio, grande e extragrande) presentes na tabela do PBEV 2024. Representando-os conforme a tabela a seguir.

**Figura 12 - Dados extraídos da tabela PBEV 2024**

Categoria	Marca	Modelo	Versão	Motor	Tipo de Propulsão	Combustível	Km/L ou "l e"		Consumo energético (MJ/Km)
							(Urbano)	(Estrada)	
Compacto	Neta	AYA	Confort4S	Elétrico	Elétrico	Elétrico	52,90	42,70	0,43
Compacto	Pegeout	208	Style MT	1.0 - 6V	Combustão	Flex	13,30	15,80	1,47
Compacto	Mini	Cooper	S5P	2.0 - 16V	Combustão	Gasolina	10,30	13,20	1,91
Médio	Hyunday	IONIQ	HEV	1.6 - 16V	Híbrido	Gasolina	18,90	18,80	1,09
Médio	BYD	Dolphin	GS180 EV	Elétrico	Elétrico	Elétrico	51,90	43,50	0,42
Médio	Chevrolet	Onix Plus	10MT LT1	1.0 - 12V	Combustão	Flex	13,50	17,40	1,42
Médio	BMW	118i	-	1.5 - 12V	Combustão	Gasolina	11,50	13,00	1,78
Grande	Toyota	Corolla	Apremiuh	1.8 - 16V	Híbrido	Flex	18,50	15,70	1,21
Grande	Volvo	C40	6 Ultimate	Elétrico	Elétrico	Elétrico	44,20	38,40	0,49
Grande	Toyota	Corolla	XEI 20	2.0 - 16V	Combustão	Flex	12,30	14,90	1,60
Grande	Nissan	Sentra	Sense	2.0 - 16V	Combustão	Gasolina	11,00	13,90	1,79
Extra Grande	Honda	Accord Hybrid	Touring	2.0 - 16V	Híbrido	Gasolina	17,80	16,10	1,23
Extra Grande	BMW	320i	Sport GP Flex (MY25)	2.0 - 16V	Combustão	Flex	10,90	13,30	1,83
Extra Grande	AUDI	A4 Sedan	S line	2.0 - 16V	Combustão	Gasolina	10,50	12,50	1,93
Extra Grande	JAC	e-J7	e-J7	Elétrico	Elétrico	Elétrico	44,00	37,10	0,50

Fonte: Adaptado Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) PBEV - Veículos leves 2024 - 16º Ciclo

Os veículos elétricos, por não utilizarem combustíveis convencionais como os movidos a combustão interna, são apresentados com o termo “Km/l e” ao invés de “Km/L” quando se diz respeito ao consumo por quilometro percorrido, esta unidade de medida é utilizada pelo INMETRO como equivalência ao consumo de combustíveis, ou seja, caso o veículo elétrico analisado fosse movido a combustão, conseguiria percorrer a distância apresentada na tabela com um único litro de gasolina, por exemplo.

Segundo o INMETRO esta conversão é utilizada com foco principal de facilitar as comparações realizadas pelos consumidores, uma vez que a apresentação do consumo de combustível em “KWh/km”, não é definida como padrão.

Analisando os dados da figura 12, os resultados demonstram que o consumo energético dos veículos puramente elétricos é consideravelmente menor em relação aos demais tipos de

propulsão em todas as categorias, chegando a ser, aproximadamente, 4.4 vezes menor que de um veículo movido puramente à gasolina dentro dos itens analisados na categoria “compacto”, o que se reflete na quantidade de quilômetros percorridos por litro de combustível.

Reorganizando os dados apresentados na figura 12 de forma crescente de acordo com o consumo energético, conforme a figura 13, é possível perceber padrões importantes:

**Figura 13 - Classificação por consumo energético**

Categoria	Marca	Modelo	Versão	Tipo de Propulsão	Combustível	Km/L ou "l e"		Consumo energético (MJ/Km)
						(Urbano)	(Estrada)	
Médio	BYD	Dolphin	GS180 EV	Elétrico	Elétrico	51,90	43,50	0,42
Compacto	Neta	AYA	Confort 4S	Elétrico	Elétrico	52,90	42,70	0,43
Grande	Volvo	C40	6 Ultimate	Elétrico	Elétrico	44,20	38,40	0,49
Extra Grande	JAC	e-J7	e-j7	Elétrico	Elétrico	44,00	37,10	0,50
Médio	Hyundai	IONIQ	HEV	Híbrido	Gasolina	18,90	18,80	1,09
Grande	Toyota	Corolla	Apremiuh	Híbrido	Flex	18,50	15,70	1,21
Extra Grande	Honda	Accord Hybrid	Touring	Híbrido	Gasolina	17,80	16,10	1,23
Médio	Chevrolet	Onix Plus	10MT LT1	Combustão	Flex	13,50	17,40	1,42
Compacto	Pegeout	208	Style MT	Combustão	Flex	13,30	15,80	1,47
Grande	Toyota	Corolla	XEI 20	Combustão	Flex	12,30	14,90	1,60
Médio	BMW	118i	-	Combustão	Gasolina	11,50	13,00	1,78
Grande	Nissan	Sentra	Sense	Combustão	Gasolina	11,00	13,90	1,79
Extra Grande	BMW	320i	Sport GP Flex (MY25)	Combustão	Flex	10,90	13,30	1,83
Compacto	Mini	Cooper	S 5P	Combustão	Gasolina	10,30	13,20	1,91
Extra Grande	AUDI	A4 Sedan	S line	Combustão	Gasolina	10,50	12,50	1,93

Fonte: Adaptado Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) PBEV - Veículos leves 2024 - 16º Ciclo

O primeiro ponto a ser observado é a relação entre o tipo de propulsão e o consumo energético, como mencionado anteriormente, sendo os veículos elétricos os de menor consumo energético, logo mais eficientes, enquanto os veículos a combustão interna têm os valores de consumo mais elevados, sendo os menos eficientes.

Outra questão importante a ser percebida é o aumento do consumo equivalente (Km/l e), dos veículos híbridos e elétricos quando expostos a percursos em rodovias, que é o efeito oposto ao observado nos veículos a combustão interna que se beneficiam de altas velocidades de rotação e do calor gerados para atingir sua eficiência máxima, enquanto os motores elétricos presentes nos veículos puramente elétrico e híbridos são projetados para se beneficiarem de baixas velocidades de rotação, necessitando de uma quantidade maior de energia para suprir as altas rotações, de forma que em veículos híbridos o sistema de propulsão a combustão interna torna-se o principal utilizado à velocidades elevadas (Sánchez, 2012).

Outro ponto a ser destacado é a diferença de autonomia de veículos híbridos e elétricos em rodovias e ciclos urbanos. Isto se deve a baixa utilização do sistema de frenagem regenerativa em trajetos de rodovias, uma vez que, de forma geral, a frenagem é mais utilizada em trajetos urbanos, devido as condições de trânsito, relevo, semáforos, regiões com grande fluxo de pedestre, entre outros fatores, fazendo com que, estes veículos apresentem uma autonomia reduzida quando expostos a longos trajetos por rodovias.

#### 4.2. Comparativo das Emissões de Gases de Efeito Estufa

A tabela abaixo, proporciona uma perspectiva completa dos níveis de poluentes e gases de efeito estufa liberados por diversas categorias de veículos, incluindo os elétricos, híbridos e a combustão. A tabela, que se concentra em várias proposições de poluentes, como: NMOG+NO<sub>x</sub>, CO, CHO e CO<sub>2</sub>. Desta forma, possibilita a comparação da eficiência ambiental

de diversas tecnologias de motorização, chegando a resultados concretos para uma avaliação das vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

**Figura 14 - Emissões de poluentes e gases de efeito estufa**

Categoria	Marca	Modelo	Versão	Tipo de Propulsão	Combustível	Emissões no Escapamento					
						Poluentes			Gás Efeito Estufa		
						NMOG+NOx (mg/km)	CO (mg/km)	CHO (mg/km)	Etanol CO2e fóssil (g/km)	Gasolina ou Diesel CO2e fóssil (g/km)	VEHP CO2e fóssil (g/km)
Médio	BYD	Dolphin	GS180 EV	Elétrico	Elétrico	0	0	0	/	-	/
Grande	Volvo	C40	6 Ultimate	Elétrico	Elétrico	ND	0	0	/	0	/
Extra Grande	JAC	e-J7	e-j7	Elétrico	Elétrico	ND	ND	ND	/	-	/
Médio	Hyundai	IONIQ	HEV	Híbrido	Gasolina	20	95	1	/	67	/
Grande	Toyota	Corolla	Apremiuh	Híbrido	Flex	18	93	2	0	75	/
Extra Grande	Honda	Accord Hybrid	Touring	Híbrido	Gasolina	12	63	1	/	76	/
Compacto	Mini	Cooper	S 5P	Combustão	Gasolina	5	101	1	0	118	/
Médio	BMW	118i	-	Combustão	Gasolina	11	160	1	/	110	/
Grande	Nissan	Sentra	Sense	Combustão	Gasolina	13	147	0	/	110	/
Extra Grande	AUDI	A4 Sedan	S line	Combustão	Gasolina	20	86	1	/	119	/
Compacto	Pegeout	208	Style MT	Combustão	Flex	29	300	1	0	92	/
Médio	Chevrolet	Onix Plus	10MT LT1	Combustão	Flex	35	378	3	0	88	/
Grande	Toyota	Corolla	XEI 20	Combustão	Flex	22	169	2	0	100	/
Extra Grande	BMW	320i	Sport GP Flex (MY25)	Combustão	Flex	24	148	1	0	115	/

Legenda: "ND" - "Não disponível"

"-" - Ausência de dados ou medições

"/" - Não registrado

Fonte: Adaptado Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) PBEV - Veículos leves 2024 - 16º Ciclo.

As informações sobre as emissões reforçam os benefícios ambientais dos carros elétricos, que não liberam poluentes durante o funcionamento. De acordo com a tabela, veículos elétricos emitem zero Gases de Efeito Estufa, bem como, outros poluentes. Em contrapartida, os carros a combustão, emitem quantidades significativas de poluição.

Apesar dos veículos elétricos serem alimentados por baterias, cuja fabricação requer a extração de metais como lítio e cobalto, estão sendo desenvolvidas tecnologias de reciclagem para reduzir esse impacto no meio ambiente (Dunn et al., 2015).

Os veículos híbridos oferecem uma solução positiva a curto-médio prazo, pois combina o motor a combustão com um sistema elétrico auxiliar. O Honda Accord Hybrid, por exemplo, apresenta menores emissões em comparação aos veículos exclusivamente a gasolina, com uma diminuição notável de CO<sub>2</sub>. No entanto, ainda depende de combustíveis fósseis, resultando em emissões, ainda que reduzidas.

## 5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a eficiência energética de motores a combustão e motores elétricos, destacando suas vantagens e limitações no contexto atual de busca por sustentabilidade e redução de impactos ambientais. Através da revisão teórica e da análise comparativa entre esses dois tipos de motores, foi possível evidenciar que, enquanto os motores elétricos apresentam uma eficiência significativamente superior em termos de conversão de energia, os motores a combustão ainda desempenham um papel importante em diversas aplicações, especialmente devido à sua autonomia e infraestrutura existente.

A eficiência energética é um fator crucial não apenas para a redução dos custos operacionais, mas também para a diminuição das emissões de gases poluentes. Os motores elétricos,

embora mais eficientes, dependem de fontes de energia renováveis para maximizar seu potencial ambiental, o que coloca em evidência a importância de uma transição energética ampla e eficaz.

Portanto, a escolha entre motores a combustão e elétricos deve considerar uma série de variáveis, como o tipo de aplicação, os custos iniciais, a infraestrutura disponível e, principalmente, o impacto ambiental a longo prazo. A combinação de tecnologias e a implementação de soluções híbridas podem ser caminhos promissores para a otimização da eficiência energética no setor de transportes e em outras áreas industriais. Para o futuro, a pesquisa contínua e a inovação tecnológica são essenciais para garantir a evolução de motores mais eficientes e sustentáveis, atendendo às necessidades econômicas e ambientais da sociedade.

## 6. AGRADECIMENTOS

A realização deste sonho não seria possível sem o apoio de muitas pessoas especiais, que trilharam esse caminho junto a nós e contribuíram de maneira significativa para nossa evolução e crescimento.

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por nos dar força e perseverança ao longo dessa jornada.

Aos nossos pais e familiares, pelo amor, suporte incondicional e por acreditarem em nós. Em especial, Cláudia, Roberto, Richard, Sarah, Amanda, Enzo, Islaine, Alberto, Roseli, Ailton, Thaina e Yasmin, pela motivação e palavras de encorajamento em momentos cruciais.

Aos nossos professores, por suas orientações, paciência e por compartilharem seus conhecimentos e experiências de forma tão generosa. Um agradecimento especial ao professor M.Sc. Fábio Roberto Vieira, por seu acompanhamento e incentivo durante todo o processo.

Aos amigos e colegas, pelo apoio e incentivo durante todos esses anos. Em destaque, Amauri, Ana, Antônio, Caio, Daniel, Everton, Gabriel, Júlia, Igor e Maria. Vocês foram essenciais para superar os desafios e tornar essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta concretização, nosso sincero agradecimento.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA GOV. INMETRO **divulga nova tabela do programa brasileiro de etiquetagem veicular**, 2024. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202402/inmetro-divulga-nova-tabela-do-programa-brasileiro-de-etiquetagem-veicular>>. Acesso em: 10 de nov. 2024.

AZEVEDO, Marcelo Henrique. **Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro**, 2018. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1579>>. Acesso em: 18 de set. 2024.

BARAN, Renato e LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**, 2011. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1489>>. Acesso em: 18 de set. 2024.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Electric Drives**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. Disponível em: Google Books. Acesso em: 01 nov. 2024.

CASTRO, Hélder, BARBOSA, João, GONÇAVES, Renato. **Quantificando as vantagens dos carros elétricos: caso de estudo**, 2020. Disponível em: <<https://www.industriaeambiente.pt/noticias/quantificando-vantagens-carros-eletricos-caso-de-estudo/>>. Acesso em: 18 de set. 2024.

CAVAGLIANO, Laís. **Análise Da Viabilidade Técnica E Econômica Da Substituição De Veículos A Combustão Interna Por Veículos Elétricos E Veículos Elétricos Híbridos No Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d5da0beb-c2fd-4c53-9297-eea8201cc41a/content>>. Acesso em: 03 de nov. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach. 5. ed.** Nova York: McGraw-Hill Education, 2006. Disponível em: Google Books. Acesso em: 01 de Nov. 2024.

CHEN, Z.; PENG, H. **Electric Vehicles: Technology and Expectations in the 21st Century. 1. ed.** Nova York: Springer, 2019. Disponível em: Springer Link. Acesso em: 03 de nov. 2024.

CORDEIRO, Ana Carolina e LOSEKANN, Luciano. **Os desafios do processo de difusão do carro elétrico no Brasil**, 2012. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/28a7/04c844642997f2143aab25578215f3257293.pdf>>. Acesso em: 30 de out. 2024.

DA SILVEIRA, Fernando Lang. Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel. **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul**, 2008. Disponível em: Google Scholar. Acesso em: 12 de dez. 2024.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Thermal Energy Storage: Systems and Applications. 2. ed.** Nova York: John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: Wiley Online Library. Acesso em: 28 de set. 2024.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 3. ed.** Boca Raton: CRC Press, 2018. Disponível em: Google Books. Acesso em: 28 de set. 2024.

GUPTA, B. R. **Vehicle Transmission Systems. 1. ed.** Nova York: Springer, 2017. Disponível em: Springer Link. Acesso em: 30 de set. 2024.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals. 1. ed.** Nova York: McGraw-Hill Education, 1988. Disponível em: Google Books. Acesso em: 30 de set. 2024. HISTÓRIA dos motores a Diesel. **Cummins**, 2023. Disponível em: <[www.iust.ac.ir/files/mech/ayatgh\\_c5664/files/internal\\_combustion\\_engines\\_heywood.pdf](http://www.iust.ac.ir/files/mech/ayatgh_c5664/files/internal_combustion_engines_heywood.pdf)> Acesso em: 22 de set. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Veículos leves 2024 - 16º Ciclo**, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2024-1.pdf/view>> Acesso em: 11 de nov. 2024.

LYON, DORSEY ALFRED, ET AL. **The Diesel Engine: Its Fuels and Its Uses**. Estados Unidos, U.S. Government Printing Office, 1918. Disponível em: Google Books. Acesso em: 12 de dez. 2024.

MCQUISTON, F. C.; PARKER, J. D.; SPITLER, J. D. **Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design**. 6. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2006. Disponível em: Google Books. Acesso em: 01 de nov. 2024.

MOHAN, N.; UNDERTSAND, M.; WILLIAMS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2003. Disponível em: Wiley Online Library. Acesso em: 05 nov. 2024.

MOTOR ciclo Diesel: princípio de funcionamento, componentes, particularidades e manutenção. **Simplo**, 2022. Disponível em: <<https://blog.simplusbr.com/motor-ciclo-Diesel/>> Acesso em: 22 de set. 2024.

MOTOR Ciclo Otto: entenda o funcionamento. **Simplo**, 2020. Disponível em: <<https://blog.simplusbr.com/motor-ciclo-Otto/>>. Acesso em: 22 de set. 2024.

MOTOR de combustão interna – Ciclo Diesel. **Brasil**, SENAI-SP Editora, 2018.

NEDER, Thulyo Nascimento. **Desafios e perspectivas da transição na indústria automotiva**, 2022. Disponível em: <[https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4329/6/MONO-GRAFIA\\_DesafiosPerspectivasTransi%c3%a7%c3%a3o.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4329/6/MONO-GRAFIA_DesafiosPerspectivasTransi%c3%a7%c3%a3o.pdf)>. Acesso em: 29 de out. 2024.

PERSPECTIVA Global de EV. **IEA**, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>>. Acesso em: 13 de nov. 2024.

SÁNCHEZ, Fernando Zegarra. **Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série**. Rio de Janeiro, fevereiro de 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Zegarra-Sanchez/publication/>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SILVA, J. S.; MARTINELLI, R. **Eficiência energética em motores de combustão interna**. SICFEI 2010. Disponível em: <[https://fei.edu.br/sites/artigos\\_sicfei\\_2010/130\\_SICFEI2020\\_ARTIGO.pdf](https://fei.edu.br/sites/artigos_sicfei_2010/130_SICFEI2020_ARTIGO.pdf)>. Acesso em: 03 de nov. 2024.