

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

ANGELO FERNANDES PEPE DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA E CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO DE
MOTORES A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL, MOTORES A DIESEL E MOTORES
ELÉTRICOS EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS PESADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2022**

ANGELO FERNANDES PEPE DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA E CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO DE
MOTORES A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL, MOTORES A DIESEL E MOTORES
ELÉTRICOS EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS PESADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Educação Superior do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Me. Sylvio Jose Gomes Magrani.

**RIO DE JANEIRO
2022**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Silva, Angelo Fernandes Pepe da

Análise comparativa e características da aplicação de motores a célula de combustível, motores a diesel e motores elétricos em veículos automotivos pesados / Angelo Fernandes Pepe da Silva – 2022.

71f. : il. (algumas color.) , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2022.

Bibliografia: f. 64-71.

Orientador: Sylvio Jose Gomes Magrani.

1. Engenharia mecânica. 2. Motores elétricos. 3. Motores (Diesel). 4. Célula combustível. 5. Veículos pesados. I. Magrani, Sylvio Jose Gomes (Orient.). II. Título.

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 n° 5281

Dedico este trabalho à minha família por
todo apoio e suporte nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Sylvio Jose Gomes Magrani, por todo suporte e atenção dedicada com sabedoria para auxiliar nessa trajetória.

Aos meus colegas de sala que motivaram durante toda a graduação a sempre persistir. Aos colegas de trabalho por contribuir com meu desenvolvimento pessoal adquirindo maturidade e experiência para estar sempre disposto a novos desafios. À minha família, todo suporte emocional e financeiro que sempre me manteve forte e perseverante a todas as dificuldades da vida, pois acredito que sem o incentivo dela seria uma trajetória muito mais difícil.

Enfim, a todos que por variados motivos ajudaram para viabilizar a realização desse estudo.

Esta máquina está destinada a
revolucionar completamente a engenharia
de motores e substituir tudo que existe.
(DIESEL, Rudolf, 1892)

RESUMO

SILVA, Angelo. **ANÁLISE COMPARATIVA E CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO DE MOTORES A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL, MOTORES A DIESEL E MOTORES ELÉTRICOS EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS PESADOS**, 2022. 71 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2022.

As revoluções industriais foram marcadas por grandes avanços tecnológicos e nos processos de produção de energia sobretudo na utilização do carvão mineral e técnicas de extração e refino do petróleo. Esses, entretanto, são fontes não renováveis que seguem sendo as mais utilizadas na atualidade em todo o mundo e são os principais emissores de gases do efeito estufa. Este estudo tem como proposta avaliar possibilidades em cenários futuros em perspectiva de uma diversificação da energia no transporte automotivo, com foco em veículos pesados. Esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo expor ideias, motivações e diferenças entre os motores apresentados com as diferentes tecnologias em veículos pesados movidos a diesel, eletricidade e célula de combustível. Por fim, fazer uma análise comparativa e discutir sobre essas tecnologias e possíveis benefícios que elas podem proporcionar ao meio ambiente.

Palavras-chave: Motores. Diesel. Célula de combustível. Elétrico. Veículos pesados.

ABSTRACT

SILVA, Angelo. **COMPARATIVE ANALYSIS AND CHARACTERISTICS OF THE APPLICATION OF FUEL CELL ENGINES, DIESEL ENGINES AND ELECTRIC ENGINES IN HEAVY-DUTY VEHICLES.** 2022. 71 pages. Final paper - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro, 2022.

The industrial revolutions were marked by great technological advances and also in the processes of producing energy, especially in the use of mineral coal and techniques for extracting and refining oil. These, however, are non-renewable sources but continue to be the most used around the world nowadays being the main emitters of greenhouse gases. This study proposes to evaluate possibilities in future scenarios regarding diversification of energy in automotive transport, with focus on heavy-duty vehicles. This final project goal is to expose ideas, motivations and differences between the engines using different technologies in heavy-duty vehicles powered by diesel, electricity, and fuel cell. Finally, propose an analysis and comparison and discuss about these technologies and possible impact on the environment.

Keywords: *Engines. Diesel. Fuel cell. Electric. Heavy-duty vehicles.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Motor de 4 tempos.	16
Figura 2 - Diagrama pressão x volume ciclo Otto ideal	18
Figura 3 - Motor de ignição por centelha de 2 tempos	19
Figura 4 - Diagrama p – V real de um motor ciclo Otto	20
Figura 5 – Ciclo Diesel ideal.....	22
Figura 6 – Diagramas de pressão no cilindro	23
Figura 7 – Principais componentes parte 1	24
Figura 8 – Principais componentes parte 2	25
Figura 9 - Partes estacionárias.....	27
Figura 10 - Partes móveis	28
Figura 11 – Consumo de energia no Brasil por segmento	33
Figura 12 – Tesla Semi	44
Figura 13 - Diagrama do princípio de funcionamento da célula de combustível	48
Figura 14 – Classificação de diferentes processos de produção do hidrogênio.....	50
Figura 15 - <i>Ford Shuttle Bus</i>	51
Figura 16 – Ônibus a célula de combustível Whistler.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz energética mundial.....	30
Gráfico 2 - Emissões globais de CO ₂	31
Gráfico 3 – Matriz energética Brasil	32
Gráfico 4 - Emissões totais no Brasil (2021) em Mt CO ₂ -eq	33
Gráfico 5 - Evolução das emissões de veículos no período de 2006 a 2019	35
Gráfico 6 – Evolução da frota circulante de caminhões por subcategoria.....	36
Gráfico 7 - Evolução da frota circulante de ônibus por subcategoria	36
Gráfico 8 – Fator de emissão para Veículos Pesados com motores do ciclo Diesel.	38
Gráfico 9 – Emissões por categoria de veículo	40
Gráfico 10 – Tipos de combustíveis em novos caminhões	42
Gráfico 11 – Veículos elétricos a célula de combustível por segmento e região 2017 – junho/2021.....	52
Gráfico 12 – Pontos públicos para carregamento de carros elétricos, 2015-2021	59
Gráfico 13 - Registros de ônibus e caminhões elétricos por região, 2015-2021	59
Gráfico 14 – Quantidade de veículos a célula de combustível elétricos 2021	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de emissão para Veículos Pesados com motores do ciclo Diesel ..	37
Tabela 2 - Principais poluentes na atmosfera, características, fontes e efeitos	39
Tabela 3 - Caminhões e ônibus elétricos, custo estimado da infraestrutura de carregamento	45
Tabela 4 - <i>Ford Shuttle Bus</i>	51
Tabela 5 - Comparação entre os três motores em veículos pesados	56
Tabela 6 - Custo total	58
Tabela 7 - Vantagens e desvantagens das três tecnologias	61

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SIGLAS

O ₂	Oxigênio
H ₂	Hidrogênio
Km	Quilômetro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono

LISTA DE ACRÔNIMOS

PSM	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
MCI	Motor de Combustão Interna
MP	Material Particulado
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (Veículo a Célula de Combustível)
RoW	<i>Rest of world</i> (Resto do mundo)
HRS	<i>Hydrogen Refuelling Station</i> (Estação de Reabastecimento de Hidrogênio)
PLDVs	<i>Passenger Light-Duty Vehicles</i> (Veículos de Passeio)
LCVs	<i>Light Commercial Vehicles</i> (Veículos Comerciais Leves)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	15
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	16
2.1.1 Motores ciclo Otto	17
2.1.2 Motores ciclo Diesel.....	21
2.1.3 Principais componentes dos motores de combustão interna ciclo Diesel.....	24
2.2 EMISSÕES	29
2.2.1 Panorama Global	29
2.2.2 Panorama Nacional	31
2.3 VEÍCULOS PESADOS MOVIDOS A ÓLEO DIESEL.....	40
2.4 USO DE MOTORES ELÉTRICOS EM VEÍCULOS PESADOS	42
2.5 CÉLULA DE COMBUSTÍVEL NO TRANSPORTE PESADO.....	46
2.5.1 Fundamentos da célula de combustível.....	46
2.5.1.1 Princípio de funcionamento da célula de combustível	48
2.5.2 Melhorias recentes na tecnologia da célula combustível elétrica em veículos pesados.....	52
3.DISSCUSSÃO... ..	55
3.1 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS ALIMENTADOS A DIESEL, BATERIA E CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.	55
4.CONCLUSÃO.. ..	62
5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

Energia, por definição, é a capacidade de um corpo, uma substância ou um sistema físico possui de realizar trabalho. Atualmente existem diversas maneiras de chegar ao objetivo final, que é de fato, produzir energia. Existem vários fatores que influenciam na escolha de uma determinada fonte de energia, como custo, condições climáticas, geografia, disponibilidade de matéria prima na natureza, impacto ao meio ambiente, entre outros.

Assim, os motores a combustão interna fazem grande parte do fornecimento de energia que colabora com sua parcela de energia que propulsiona o avanço da sociedade. Dentre eles estão os motores a combustão interna alimentados a derivados de petróleo, como gasolina, óleo diesel, gás natural, etanol, ou ainda misturas contendo óleo e alimentados a células combustível, ademais os motores elétricos estão conquistando seu espaço no mercado automobilísticos, sendo inclusive utilizados em veículos de grande porte. Portanto, ao longo do desenvolvimento desse trabalho o objeto de estudo demonstrará suas particularidades.

Um veículo é classificado como pesado nos Estados Unidos da América, se tiver uma classificação de peso bruto do veículo superior a 11,8 toneladas (*Alternative Fuels Data Center, 2021*). O peso bruto é o peso máximo carregado do veículo, que é o peso do veículo além de sua carga útil. Segundo a resolução do CONTRAN, no Brasil, os veículos pesados possuem um peso bruto acima de 3500 quilos e algumas características específicas como, por exemplo, poder tracionar ou arrastar outro veículo, respeitada a capacidade máxima de tração (CONTRAN, 2021).

Ao consultar a matriz energética na atual conjuntura mundial e brasileira consegue-se extrair conclusões interessantes sobre o panorama geral de produção e consumo de energia.

No cenário mundial, cerca de 80% da energia total provém da soma de petróleo e derivados com outras fontes não renováveis (IEA, 2021). Essa porcentagem reflete no ramo automobilístico com a grande utilização do meio de transporte rodoviário com a utilização de combustíveis derivados do petróleo, sobretudo em veículos pesados.

É importante salientar que, historicamente, o Brasil adotou um sistema de transporte rodoviário. Assim, favoreceu com que, mesmo não sendo o modelo com rendimento energético tão bom quanto os outros modais de transporte, o modelo rodoviário é o predominante no transporte de cargas. De acordo com um estudo do Panorama ILOS 2016, essa categoria representa cerca de 63% da movimentação de cargas no território brasileiro.

O cenário de transporte em veículos pesados alimentados por fontes alternativas de energia, no Brasil, é promissor já que aproximadamente 50% da energia elétrica produzida é proveniente de fontes renováveis (BEN, 2021). Tal fato cria condições favoráveis para o uso crescente de veículos elétricos a bateria e para veículos a célula combustível, pois a energia primária ser proveniente de uma fonte renovável é fundamental para a redução da emissão de poluentes.

1.1 MOTIVAÇÃO

O projeto tem como proposta avaliar possibilidades de cenários futuros de diversificação da energia no transporte automotivo. Para tal, deve-se analisar novas tecnologias e mensurar suas possibilidades, vantagens e desvantagens, para assim, entender se é viável e em qual cenário é mais bem aceito a fim de conciliar custos e preservação ao meio ambiente.

O avanço da tecnologia tem como consequência uma demanda cada vez maior por energia. O desenvolvimento da sociedade depende da produção de energia que impulsiona o progresso seja para qual for a finalidade. Os veículos de grande porte como ônibus e caminhões fazem parte desse avanço e consomem bastante energia todos os dias.

A perspectiva da matriz energética mundial a médio prazo para atender a necessidade de redução da emissão de poluentes implica na utilização de fontes alternativas de energia. Importante salientar, portanto, que a célula combustível e motores elétricos terão seu espaço e o avanço nos estudos dessas poderosas fontes de energia permitirão que estas venham a dominar o mercado.

1.2 OBJETIVOS

O aumento da demanda de transporte por caminhões no Brasil e no mundo globalizado e assim, por consequência, maior emissão de gases de efeito estufa, aumenta o interesse de estudos para desenvolver tecnologias alternativas para movimentação de veículos pesados.

Dessa forma, os objetivos para reduzir e mitigar as emissões em todos os setores foram definidos por muitos governos em relação ao setor de transporte.

Este trabalho tem como meta apresentar uma análise de conceitos e aplicações de motores a combustão interna a diesel e uma análise comparativa de modelos alternativos em veículos pesados envolvendo motores alimentados a célula combustível e elétricos a bateria.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

As máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes: combustão, energia elétrica, energia atômica etc. (Motores de Combustão Interna). Nesse sentido, os principais motores de combustão interna foram inventados no século XIX e foi uma das invenções que mais impactou na sociedade e na vida das populações. Dessa forma, tinham grandes vantagens em relação as máquinas térmicas que existiam na época com motores a vapor geralmente alimentados a lenha.

Em 1862 surgiu na França o modelo de 4 tempos pelo engenheiro Alphonse Beau de Rochas que trouxe assim grande vantagens e aplicações que perpetuam até hoje em dia. Dessa maneira, os motores de combustão interna são utilizados nos principais veículos automotivos na atualidade como por exemplo em caminhões, aviões, locomotivas, motos, carros além de ter outras aplicações na produção de energia.

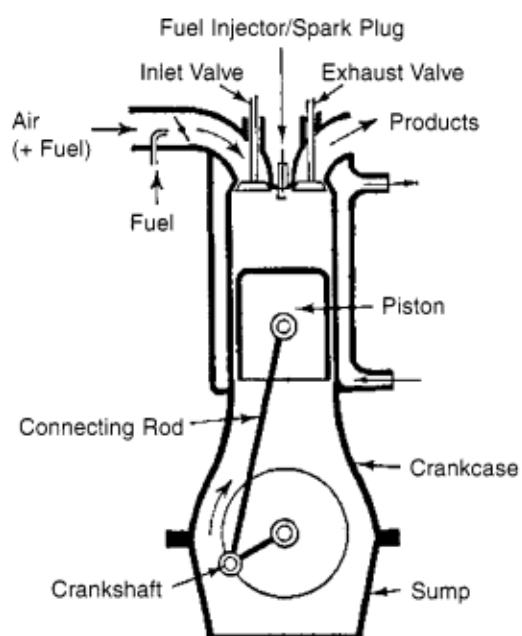


Figura 1 – Motor de 4 tempos.
Fonte: *Automotive Engineering Fundamentals*

O rendimento dos motores tem subido consideravelmente ao longo das décadas e a emissão dos poluentes é hoje cerca de 100 vezes inferior aos de há 40 anos atrás. (MARTINS, JORGE, Motores de Combustão Interna, 2006). Contudo, é reconhecido que o motor de combustão interna é um dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica e pelo consumo das reservas de petróleo bruto, o seu uso continua em alta nos últimos anos, principalmente no universo dos transportes automotivos pesados.

2.1.1 Motores ciclo Otto

Criado em 1876 por Nikolaus Otto, engenheiro alemão, o motor desenvolvido possui alto rendimento energético provido da energia da queima do combustível nos cilindros. Dessa forma, funcionando em 4 tempos que acontecem de modo a completar um ciclo.

Os primeiros modelos criados eram movidos a gás e posteriormente foi implementada a alimentação a gasolina. Na teoria, o ciclo é apresentado na figura 2 é constituído de 4 etapas:

1. Admissão (A→B)

Inicialmente, a válvula de admissão abre enquanto a válvula de saída permanece fechada. Assim, o pistão se move para admitir mistura de ar e combustível no cilindro. A pressão é mantida constante.

2. Compressão (B→C)

Na segunda etapa, as válvulas ficam fechadas enquanto o pistão se movimenta, dessa maneira, comprimindo a mistura. Diminui o volume e aumenta a pressão.

3. Expansão (C→D)

A vela de ignição solta uma faísca que faz com que a mistura entre em combustão. Nesse processo de queima, parte da energia térmica é transformada em movimento mecânico do veículo.

4. Exaustão (D→A)

Finalmente, o processo de transferência isométrica de calor a volume constante.

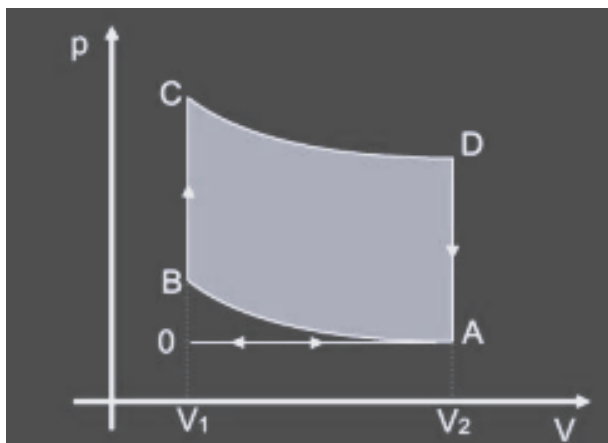


Figura 2 - Diagrama pressão x volume ciclo Otto ideal
Fonte: Lang, 2001

Além do motor de quatro tempos, há os motores a dois tempos, como na figura 3. Os motores deste tipo combinam as funções de um motor de quatro tempos em dois tempos, logo, a cada volta do virabrequim ocorre um ciclo de admissão, compressão, combustão e exaustão.

No primeiro tempo pode ser definido considerando o pistão no ponto morto superior e a mistura comprimida no cilindro produzindo assim a rarefação no cárter, em seguida ocorre a ignição e a combustão da mistura, fechando o primeiro tempo.

Por fim, no segundo tempo, os gases gerados da combustão se expandem fazendo o pistão descer, comprimindo com isso a mistura no cárter. Dessa forma, o pistão em seguida abre a janela de exaustão permitindo a saída dos gases queimados.

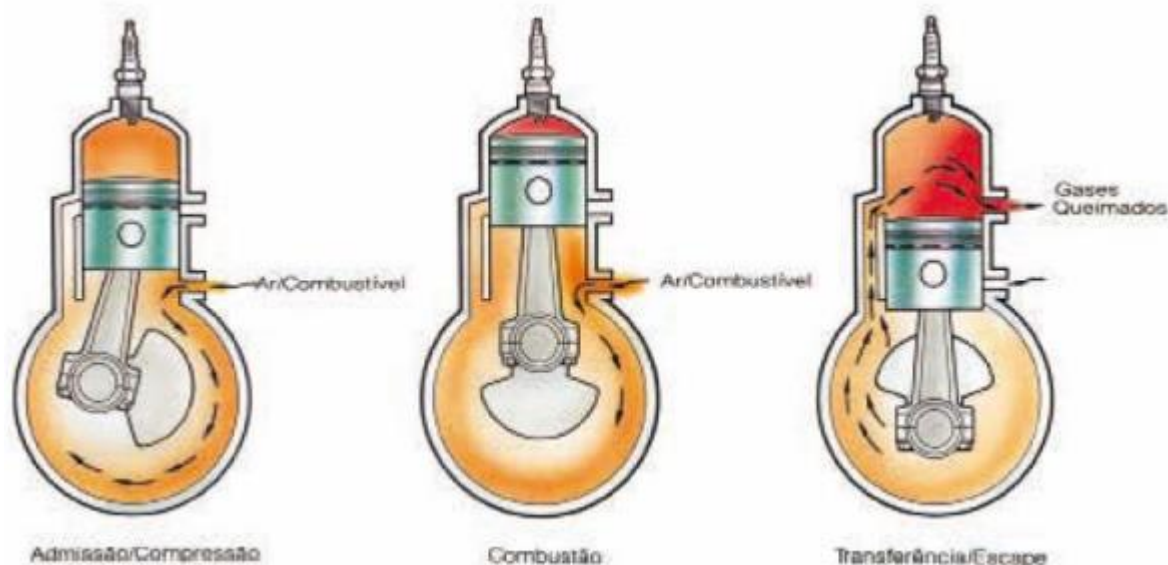


Figura 3 - Motor de ignição por centelha de 2 tempos
Fonte: Mahle, 2019

Vale ressaltar que, Nikolaus Otto foi a primeira pessoa a construir um motor de quatro tempos. Um motor estacionário que utilizava uma mistura de carvão e combustível. Os motores de 2 tempos por apresentarem menor eficiência e maior índice de emissão de poluentes foram descontinuados para o uso automotivo e somente são utilizados para aplicações bem distintas envolvendo motores de baixa potência e baixo custo ou grandes motores de propulsão marítima. Os modernos motores de quatro tempos usando vela de ignição são chamados motores ciclo Otto. É, dessa forma, o ciclo termodinâmico mais comum em motores automotivos, com o princípio de uma massa de fluido que se submete a mudança de pressão, volume, temperatura, adição e remoção de calor.

Já a figura 4 apresenta um diagrama $p - V$ real de um motor ciclo Otto.

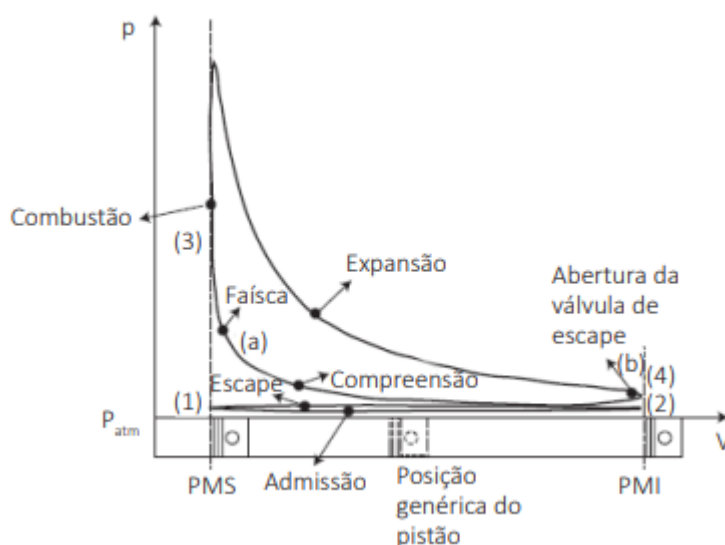


Figura 4 - Diagrama p – V real de um motor ciclo Otto
Fonte: Brunetti, 2012

Analisando as regiões do diagrama p – V da figura 4 temos:

(1) → (2) Admissão: o pistão é deslocado do PMS ao PMI com a válvula de admissão aberta, permitindo a entrada de mistura ar/combustível no cilindro. A pressão em seu interior se mantém um pouco menor do que a pressão atmosférica e depende da perda de carga no sistema de admissão devido ao escoamento da mistura combustível e ar que sofre sucção pelo movimento do pistão (BRUNETTI, 2012).

(2) → (3) Compressão: é fechada a válvula de admissão e a mistura aprisionada no cilindro é comprimida pelo pistão que se desloca do PMI ao PMS. Nessa etapa, observa-se a diminuição do volume do fluido ativo e ocorre o aumento da pressão. Antes do pistão atingir o PMS ocorre a liberação da faísca no ponto (a), e se observa um aumento da pressão devido à combustão da mistura (BRUNETTI, 2012).

(3) → (4) Expansão: após a combustão da mistura, o pistão é empurrado pela força oriunda da pressão dos gases, deslocando-se do PMS ao PMI e provocando o aumento do volume do fluido ativo e a consequente redução de pressão. É nesse momento que o motor “produz” trabalho positivo.

(4) → (1) Escape: no ponto (b) é aberta a válvula de escape, e os gases, devido à maior pressão, escapam rapidamente até atingir uma pressão próxima a pressão atmosférica. O pistão é deslocado do PMI para o PMS expelindo os gases

queimados contidos no cilindro e a pressão é mantida um pouco maior do que a pressão atmosférica. Após alcançado o PMS, o ciclo é reiniciado.

2.1.2 Motores ciclo Diesel

Em 27 de fevereiro de 1892, o engenheiro Rudolf Diesel apresentou patente com o Escritório Imperial de Patentes em Berlim para uma “nova máquina térmica racional”. Em 23 de fevereiro de 1893, foi-lhe concedido a patente DRP 67207 para o "Método de operação e projeto para motores de combustão" datado de 28 de fevereiro de 1892. Este foi um primeiro passo importante em direção à meta que Diesel se propôs, que, como se depreende de sua biografia, o preocupava desde os tempos de estudante universitário.

O funcionamento de motores de combustão segundo ciclo Diesel é caracterizado por um pistão comprimindo somente ar em um cilindro, com uma taxa de compressão elevada, de tal forma que a temperatura gerada como resultado dessa compressão fica acima da temperatura de autoignição do combustível que está sendo usado (curva 1-2 do diagrama na figura 5), após que, devido ao retorno do pistão e à expansão do ar comprimido, desencadeada como resultado (curva 2-3 do diagrama na figura 5), onde o combustível é fornecido gradualmente do ponto morto em diante fazendo com que a combustão ocorra sem aumentar significativamente a pressão e a temperatura, após, o término do fornecimento de combustível, a massa de gás no cilindro se expande ainda mais (curva 3-4 de o diagrama da figura 5) aumentando o volume (*Handbook of Diesel Engines*, 2010).

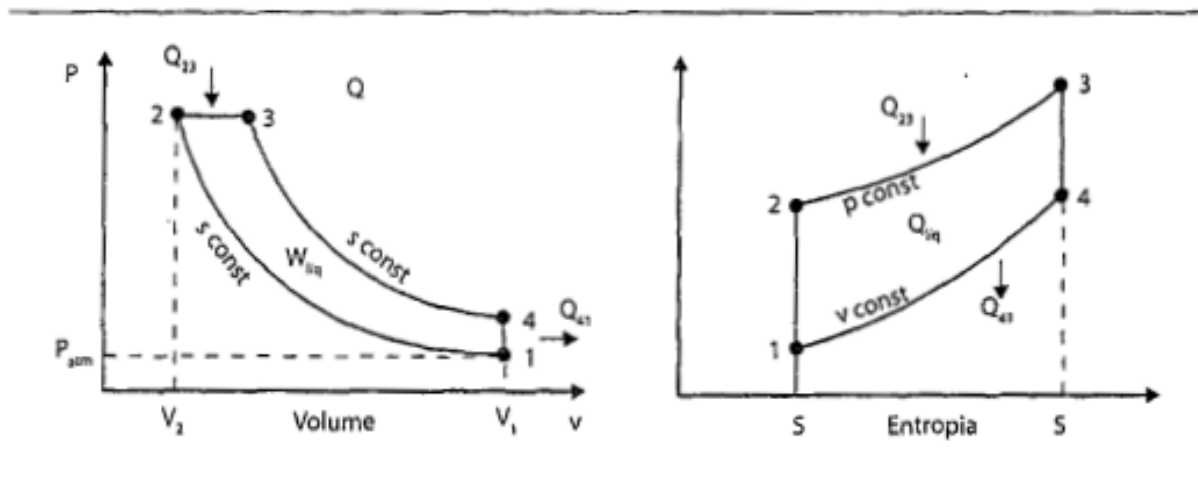


Figura 5 – Ciclo Diesel ideal
Fonte: Franco Brunetti, Motores de Combustão Interna Volume 1

O ciclo Diesel ideal é apresentado na figura 5 e é constituído de 4 etapas:

- 1→2: Compressão isentrópica
- 2→3: Fornecimento de calor a pressão constante (isobárico)
- 3→4: Expansão isentrópica
- 4→1: Liberação de calor a volume constante

O ciclo inicia-se com o êmbolo posicionado no ponto morto superior (PMS). A válvula de admissão nesse momento abre-se e o êmbolo ao descer aspira o ar para dentro do cilindro. Em seguida, o êmbolo atinge o Ponto Morto Inferior (PMI), fecha a válvula de admissão e começa a compressão. A temperatura do ar dentro do cilindro aumenta devido à diminuição do volume. O combustível começa a ser pulverizado pouco antes no PMS, se espalhando em finas gotículas, misturando-se com o ar quente até entrar em combustão. Esta combustão, é controlada pela taxa de injeção de combustível. Em sequência, a expansão inicia-se após o PMS do êmbolo com a mistura de ar e combustível na proporção adequada para uma combustão espontânea. Seguindo, por fim, com a fase de escape, onde o embolo retorna ao PMS, fazendo com que os gases sejam expulsos de dentro do cilindro, reiniciando o ciclo.

Enquanto os motores a gasolina possuem uma mistura ar/combustível homogênea, os motores diesel possuem uma mistura heterogênea antes da ignição, que consiste em gotículas de combustível distribuídos por toda a câmara de combustão. Desde que a relação ar/combustível da mistura homogênea esteja dentro dos limites de ignição, a combustão em motores a gasolina ocorre por ignição

por faísca oriunda de uma descarga elétrica em uma vela de ignição. Nos motores diesel, não sendo necessário uma ignição por centelha, ocorre a autoignição da mistura devido ao aumento da temperatura provocada pela alta taxa de compressão.

Já a figura 6 apresenta um diagrama $p - V$ ao lado do diagrama $p - \alpha$ real correspondente de um motor ciclo Diesel.

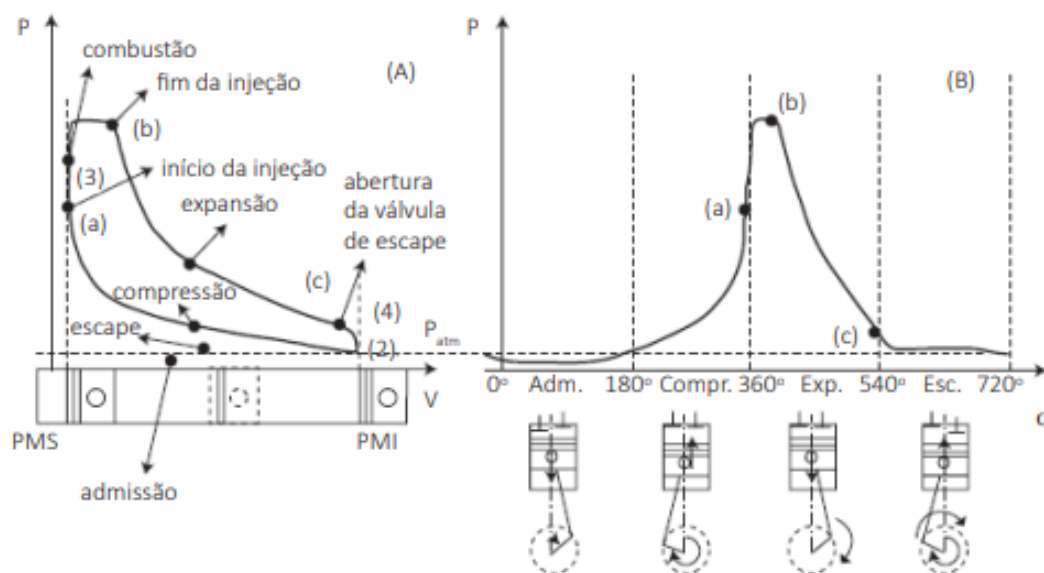


Figura 6 – Diagramas de pressão no cilindro
Fonte: Brunetti, 2012

Para a análise do diagrama $p - V$, para um motor ciclo diesel 4T da figura 6:

(1) → (2) Admissão: ocorre da mesma maneira que no motor ciclo Otto, no entanto, o fluido admitido é apenas ar.

(2) → (3) Compressão: análoga ao observado no motor ciclo Otto, sendo que no ciclo diesel a pressão final é mais elevada devido à maior taxa de compressão necessária para ultrapassar a temperatura de autoignição do combustível.

(3) → (4) Combustão e Expansão: injeção do combustível de maneira controlada, do ponto (a) ao ponto (b) e da expansão simultânea, a pressão se mantém aproximadamente constante, formando o patamar do diagrama.

(4) → (1) Escape: ocorre exatamente da mesma maneira que no motor ciclo Otto.

2.1.3 Principais componentes dos motores de combustão interna ciclo Diesel

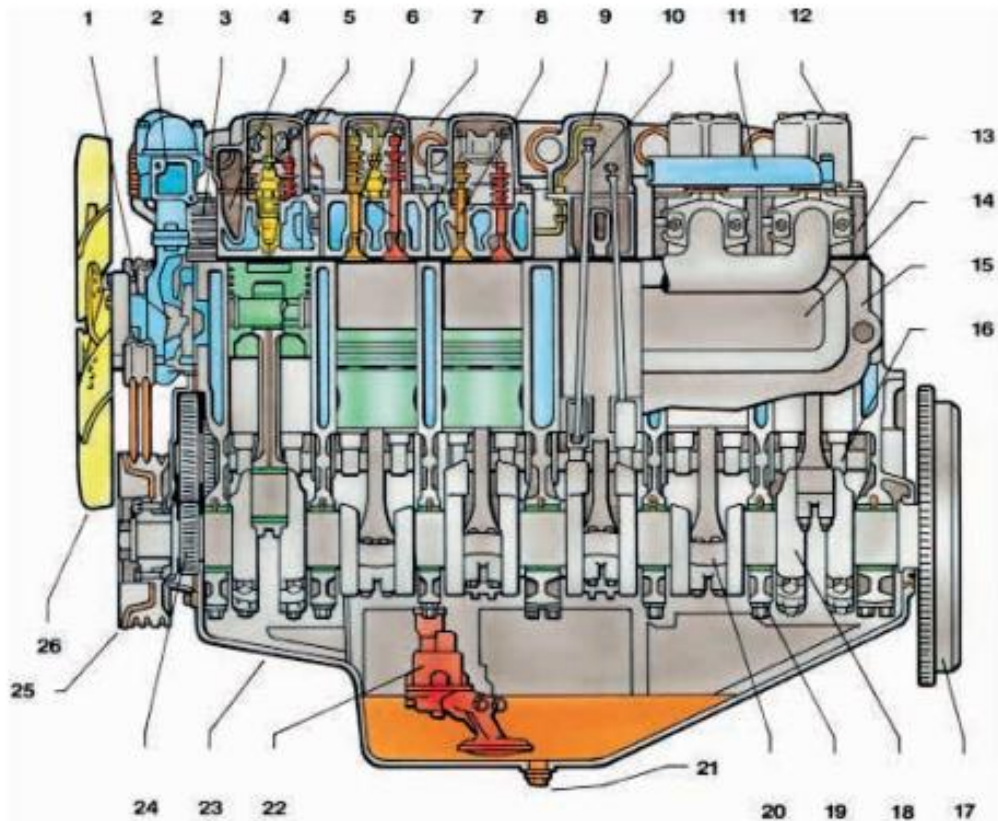


Figura 7 – Principais componentes parte 1
Fonte: MAHLE, 2019

- 1- Bomba-d'água
- 2- Termostato da água de refrigeração ou válvula termostática
- 3- Compressor de ar
- 4- Duto de admissão
- 5- Bico injetor
- 6- Válvula de escape
- 7- Coletor de admissão
- 8- Válvula de admissão
- 9- Linha de injeção de combustível
- 10- Vareta de válvula
- 11- Duto de saída de água de refrigeração
- 12- Tampa de válvula

- 13- Cabeçote
- 14- Tampa lateral do bloco
- 15- Bloco do motor
- 16- Eixo comando de válvulas
- 17- Volante
- 18- Eixo virabrequim
- 19- Capa do mancal principal
- 20- Biela
- 21- Bujão de escoamento do óleo do cárter

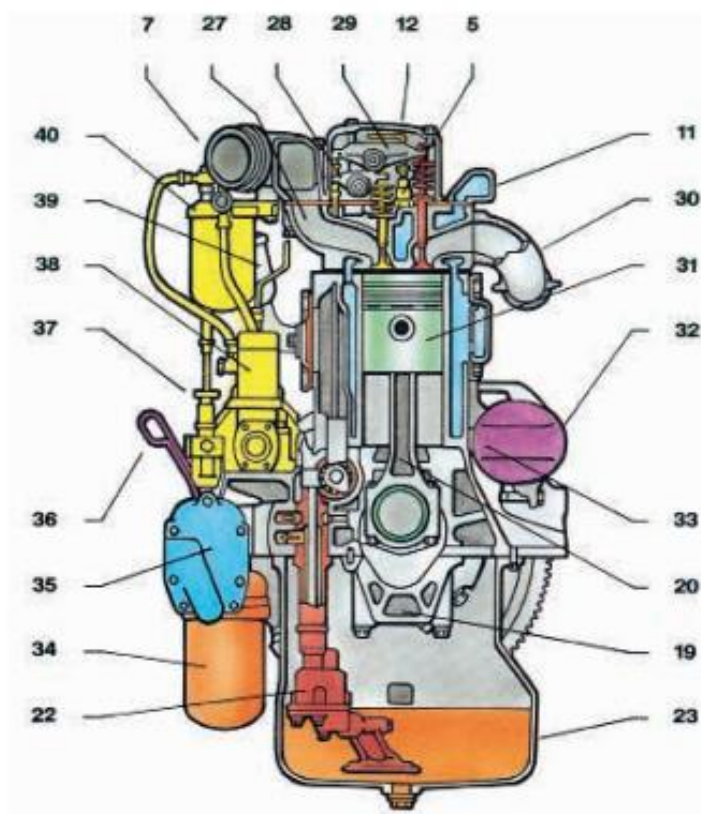


Figura 8 – Principais componentes parte 2
Fonte: MAHLE, 2019

- 22- Bomba de óleo
- 23- Cárter
- 24- Engrenagem do eixo virabrequim
- 25- Polla anti-vibradora
- 26- Hélice
- 27- Duto de admissão tangencial

- 28- Balancim da válvula de admissão
- 29- Balancim da válvula de escape
- 30- Coletor de escape
- 31- Pistão
- 32- Motor de partida
- 33- Dreno da água de refrigeração
- 34- Filtro de óleo
- 35- Radiador de óleo
- 36- Vareta indicadora do nível de óleo
- 37- Bomba manual de combustível
- 38- Bomba injetora
- 39- Respiro do cárter
- 40- Filtro de combustível

Os órgãos principais do motor são basicamente divididos em estacionários e móveis. Dessa forma os principais órgãos estacionários são compostos pelo cabeçote, bloco e cárter.

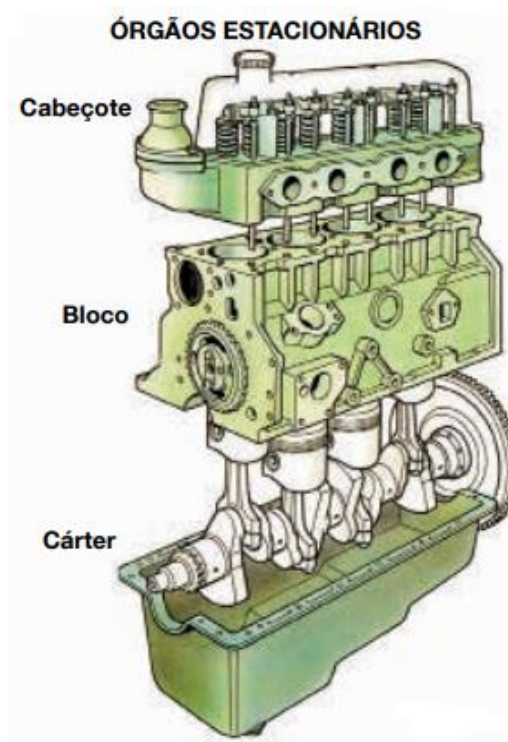


Figura 9 - Partes estacionárias
Fonte: MAHLE, 2019

O cabeçote tem função de servir como uma tampa para os cilindros. No qual, o pistão ao movimentar para cima, comprime o combustível misturado com o ar. Ademais, suporta o conjunto de válvulas.

O bloco, onde se localiza o “coração” do motor, onde estão os cilindros. Na parte de baixo do bloco estão os alojamentos dos mancais centrais onde se apoia o virabrequim. Na maioria dos casos o eixo de comando de válvulas também se localiza no bloco.

A tampa inferior é representada na figura 9 pelo cárter. Este, portanto protege os componentes inferiores do motor e é onde fica depositado o óleo lubrificante.

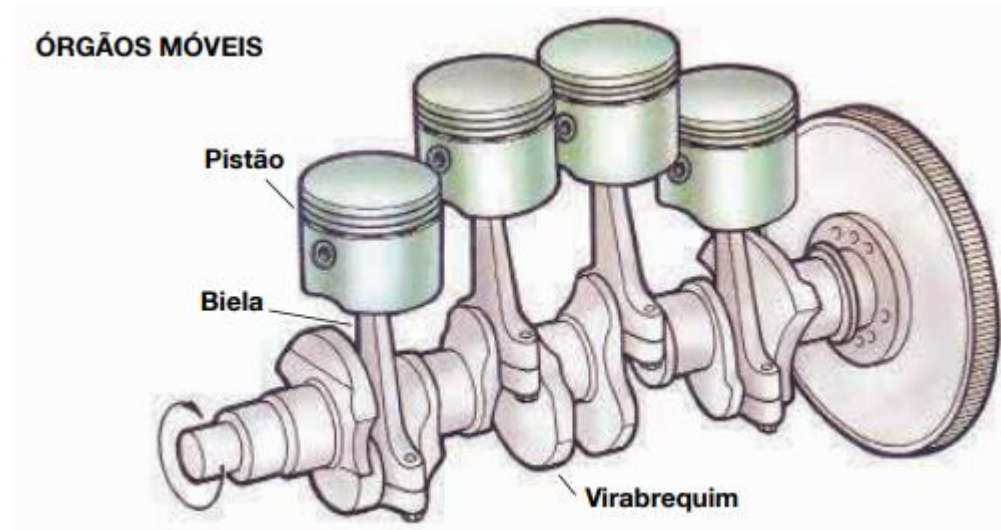


Figura 10 - Partes móveis
Fonte: MAHLE, 2019

O pistão é a parte móvel, que desliza dentro do cilindro entre o PMI e o PMS e delimita a câmara de combustão, juntamente com a parte inferior do cabeçote. Com a expansão dos gases queimados, recebe essa força e transmite à biela por intermédio de um pino do pistão. A maioria dos pistões são fabricados em liga de alumínio, pelo processo de fundição por injeção sobre pressão (TILLMANN, 2013). As ligas de alumínio são usadas como materiais de pistão e tendo elementos como silício, ferro, cobre, manganês, níquel, zinco, titânio, cromo e chumbo são adicionados como elementos de liga. Ao adicionar esses elementos ao alumínio em diferentes proporções, a resistência da liga de alumínio aumenta contra impacto, calor, corrosão e abrasão (YENMAK, 2022).

As bielas são os braços de ligação entre o pistão e o virabrequim, ela recebe o impulso do pistão e transmite ao eixo de manivelas. Esse conjunto, transforma o movimento retilíneo alternado dos pistões em um movimento rotativo do virabrequim.

Por fim, não menos importante, o eixo de manivelas, também denominado como árvores de manivelas ou virabrequim. É o eixo motor propriamente dito, na maior parte das vezes instalados na parte inferior do bloco, recebendo as bielas que imprimem o movimento rotativo. Vale a pena salientar que, por vezes, para motores de grande porte em veículos pesados, o virabrequim é instalado no cárter.

2.2 EMISSÕES

2.2.1 Panorama Global

A cada dia mais medidas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa são adotadas ao redor do mundo para que os efeitos negativos do fenômeno em nosso planeta sejam menos intensos. Motores a diesel, apesar de serem muito importantes para os avanços da sociedade, geram um alto nível de emissões de gases de exaustão como óxidos de nitrogênio que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (DINESH, 2018).

Veículos pesados diesel liberam três grandes tipos de emissões: óxidos de carbono, óxidos de nitrogênio, e material particulado (GREIM, *Diesel engine emissions*, 2019). Emissões em veículos pesados tendem a variar muito dependendo do peso, modo de condução, idade, terreno e a manutenção do veículo e de seu motor (CLARK, *Factors affecting heavy-duty diesel vehicle emissions*, 2002). Em relação às emissões de NO_x, o caminhão médio emite em torno de 4,5 g/km, que em comparação com um carro a gasolina, pode ser 10 vezes maior (BADSHAH, *Current State of NO_x Emissions From In-Use Heavy-Duty Diesel Vehicles in the United States*, 2019). Para combater as emissões, existe uma tecnologia de sistema de tratamento que pode ser instalada, que processa alguns dos gases de escape em substâncias não prejudiciais ao ambiente. Por exemplo, um catalizador que usa as reações entre amônia e NO_x para formar nitrogênio e vapor de água como resultado (LIU, *Overview of heavy-duty diesel engines*, 2010). Isso ajuda na redução da quantidade de NO_x que é liberado no meio ambiente.

Segundo o comitê da ONU para alterações climáticas, para o mundo tentar manter o aumento da temperatura abaixo de 2°C a partir dos níveis pré-industriais exigirá mudanças imediatas e significativas as próximas 3 décadas (UNFCCC, 2015). As emissões globais de gases do efeito estufa aumentaram de 33.820 milhões de toneladas (Mt) de CO₂ em 1990 para 48.890 (Mt) CO₂ em 2014 (WRI, 2018), o que mostra um aumento de 45% nas emissões globais de gases do efeito estufa.

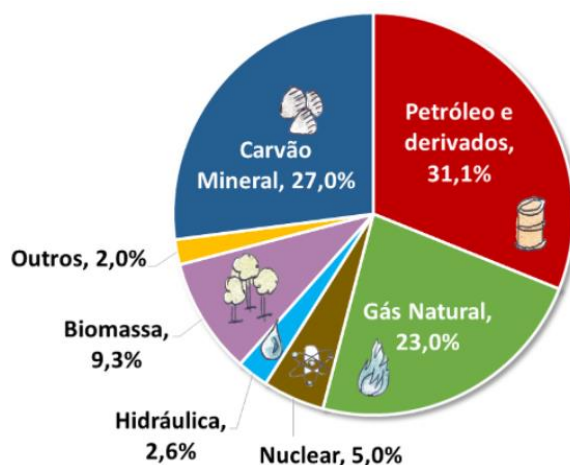


Gráfico 1 – Matriz energética mundial
Fonte: IEA, 2021

A matriz energética atual demonstra que mais de 80% da energia no planeta provém de fontes não renováveis (IEA, 2021). O aumento do consumo de energia proveniente das energias não renováveis no mundo elevou o nível das emissões nas últimas décadas e contribuíram para a atual conjuntura. O petróleo e seus derivados são a principal fonte de energia, seguido pelo carvão mineral e o gás natural. O desafio de mudar a matriz energética para o futuro é enorme e tem demandado muitos estudos e evoluções tecnológicas para viabilizar o uso de novas fontes.

Para a locomoção rodoviária em transportes pesados, a inserção de veículos movidos por fontes alternativas de energia do tipo elétrica, seja por célula de combustível ou por baterias para alimentar motores elétricos deve ser preferencialmente ser proveniente de fonte limpa e renovável.

Em 2020, a OMS declarou que o surto do novo coronavírus constituía uma Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional (ESPII), fato que impactou muito no uso da energia tendo em vista as limitações operacionais e restritivas para a contenção da pandemia. As emissões globais de CO₂ caíram 5,8% em 2020, ou o referente a quase 2 Gt CO₂, um declínio quase cinco vezes maior do que o declínio de 2009 que seguiu a crise financeira global. As emissões de CO₂ caíram mais do que a demanda de energia em 2020 devido à pandemia que atingiu a demanda por petróleo e carvão com mais força, enquanto as renováveis por sua vez, aumentaram. Apesar do declínio em 2020, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia permaneceram em 31,5 Gt, o que contribuiu para que o CO₂ atingisse sua maior concentração média anual na atmosfera, cerca de 50% maior

(IEA, 2021). No gráfico 2, observa-se a evolução das emissões globais de CO₂ de 1990 até 2021.

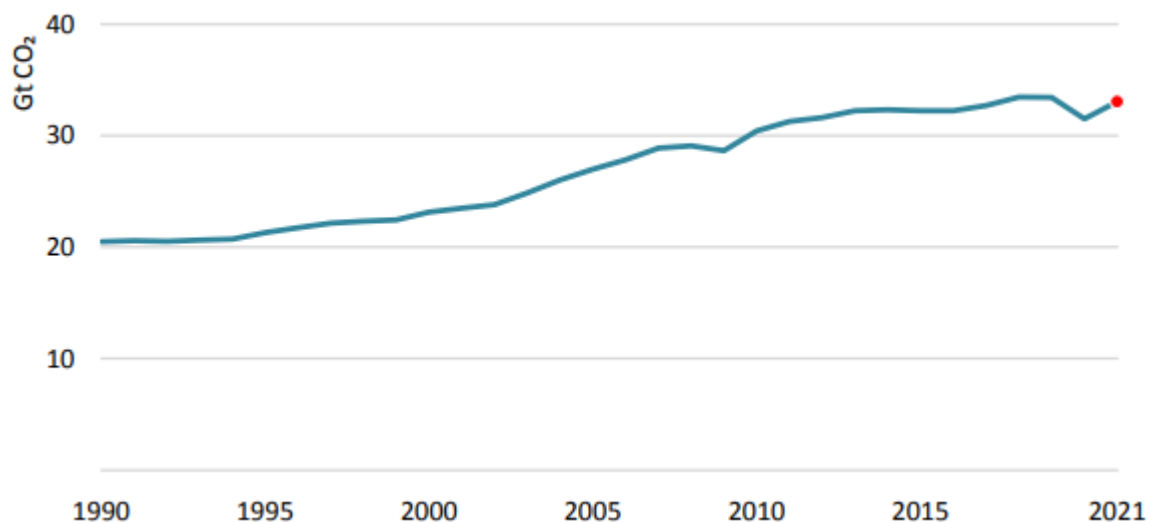


Gráfico 2 - Emissões globais de CO₂
Fonte: IEA, 2021

2.2.2 Panorama Nacional

A matriz energética brasileira, apresenta um balanço energético promissor principalmente quando comparado com a matriz global pois cerca de 50% do total das fontes de energia são renováveis. Por outro lado, petróleo e derivados ainda são a maior fatia com mais de 30% da energia total consumida. De acordo com o gráfico 3 (BEN,2021), a cana de açúcar lidera a produção de energia primária com cerca de 19%, seguida da hidráulica representando próximo de 13% da energia total consumida em território brasileiro.

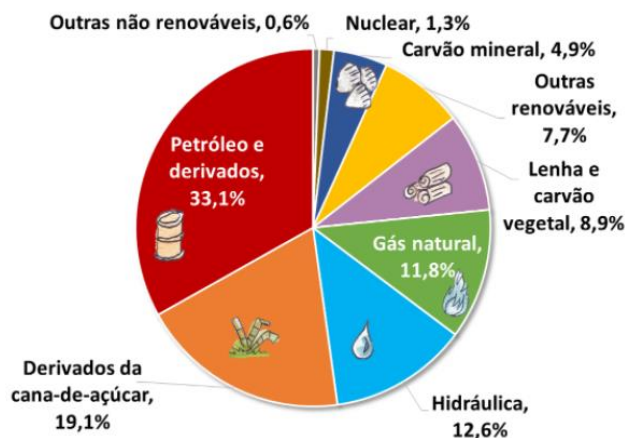


Gráfico 3 – Matriz energética Brasil
Fonte: BEN, 2021

No Brasil, a questão referente a utilização de veículos pesados movidos por fontes alternativas de energia, como veículos elétricos e veículos movidos por hidrogênio podem ser interpretados de forma positiva no sentido de ser uma opção racional no mercado. Isso é devido a que, boa parte da energia primária, advém de fonte limpa e renovável.

Após a aprovação pelo Congresso Nacional, foi concluído o processo de ratificação do acordo de Paris. No dia 21 de setembro de 2016 o documento foi entregue às Nações Unidas. Sendo assim, as metas brasileiras deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais.

Segundo o BEN, em 2021, a oferta total de energia disponibilizada no país registrou um avanço de 4,5% em relação a 2020. A participação de fontes renováveis na matriz energética foi marcada pela queda da oferta de energia hidráulica, associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas (BEN, 2021). Entretanto, o incremento das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica e o biodiesel contribuíram para que a matriz energética brasileira se mantivesse em um patamar renovável de 44,7%, muito superior ao observado no resto do mundo.

Importante entender quem usa a energia no Brasil. Em 2021, foi sobretudo o setor industrial e o transporte de carga e de passageiros, respondendo por cerca de 65% do consumo de energia no país. Houve um aumento geral de 3,4% do uso de energia em 2021 em relação ao ano anterior. O setor de transportes apresentou o maior avanço entre os setores e se tornou, novamente, o líder no Brasil, em termos de consumo energético.



Figura 11 – Consumo de energia no Brasil por segmento
Fonte: BEN, 2021

Em 2021, o total de emissões no Brasil atingiu 445,4 milhões de toneladas de CO₂ equivalente como demonstra o gráfico 4 abaixo.

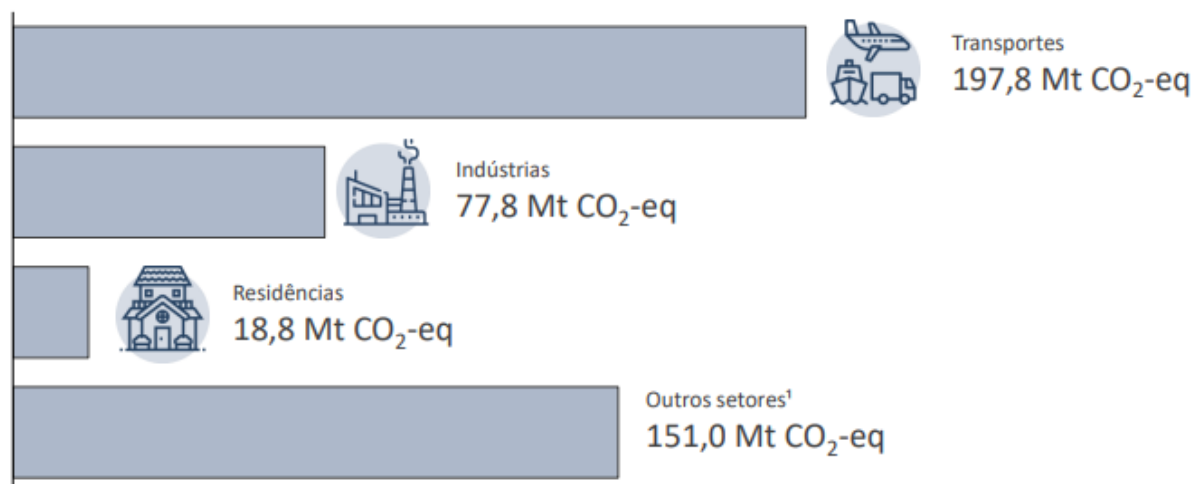


Gráfico 4 - Emissões totais no Brasil (2021) em Mt CO₂-eq
Fonte: BEN, 2021

Nos transportes, em 2021, o consumo de energia apresentou uma recuperação de 7,3% em relação a 2020, ano impactado pela pandemia do Covid-19. Os destaques foram os aumentos de 32,8% do querosene de aviação, de 9,8% da gasolina e de 9,1% do óleo diesel. No transporte de cargas rodoviário, o biodiesel

creceu 6,5% impulsionado pelo avanço de sua contraparte fóssil. Como consequência, o setor de transportes do Brasil apresentou uma matriz energética composta por 23% de fontes renováveis em 2021, contra 25% em 2020 (BEN, 2021).

Estado de São Paulo, por exemplo, veículos emitiram um total de 38,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Houve um pequeno aumento em relação ao ano anterior, pelo aumento do consumo de diesel. A maior contribuição vem dos caminhões, cerca de 17 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, seguido dos automóveis menores com cerca de 10,5 milhões de toneladas (CETESB, 2019).

O gráfico 5, demonstra a evolução das emissões veiculares no período de 2006 a 2019 no estado de São Paulo e mostra a tendência de redução da emissão da maior parte dos poluentes. A emissão de gases de efeito estufa aumentou em 2019 em razão do aumento do consumo de diesel nos veículos pesados (CETESB, 2019). Ainda que as emissões estejam decrescendo, a qualidade do ar nas grandes cidades apresenta níveis de concentração de ozônio e de material particulado (MP) que não protegem a saúde das populações expostas.

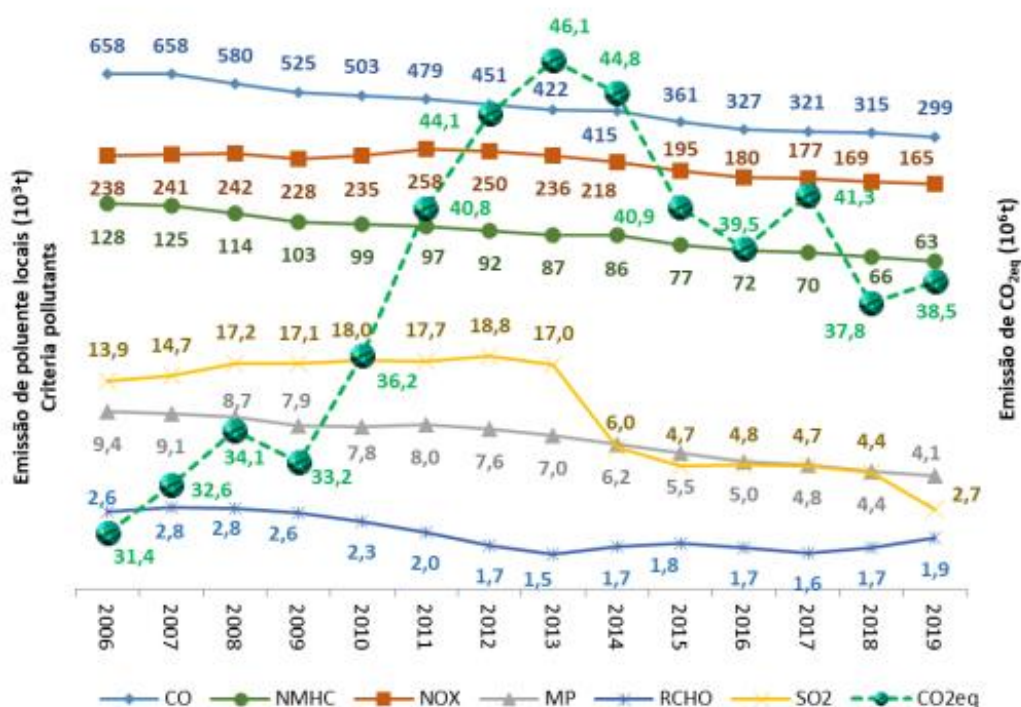


Gráfico 5 - Evolução das emissões de veículos no período de 2006 a 2019
 Fonte: CETESB, 2019

O aumento apresentado no gráfico 5 da emissão de CO_{2eq} de 2009 a 2013 tem relação direta com o aumento da frota circulante em todas as categorias de automóveis, sobretudo a frota de caminhão e ônibus no estado de São Paulo (CETESB, 2019). Os gráficos 6 e 7, abaixo, conseguem demonstrar essa evolução ano após ano em milhares de veículos pesados. Em 2009, por exemplo, a frota de caminhão era pouco mais de 350 mil chegando a mais 450 mil em 2013. Observa-se nesse período o aumento percentual da participação das subcategorias Pesados e Semipesados para a frota de caminhões.

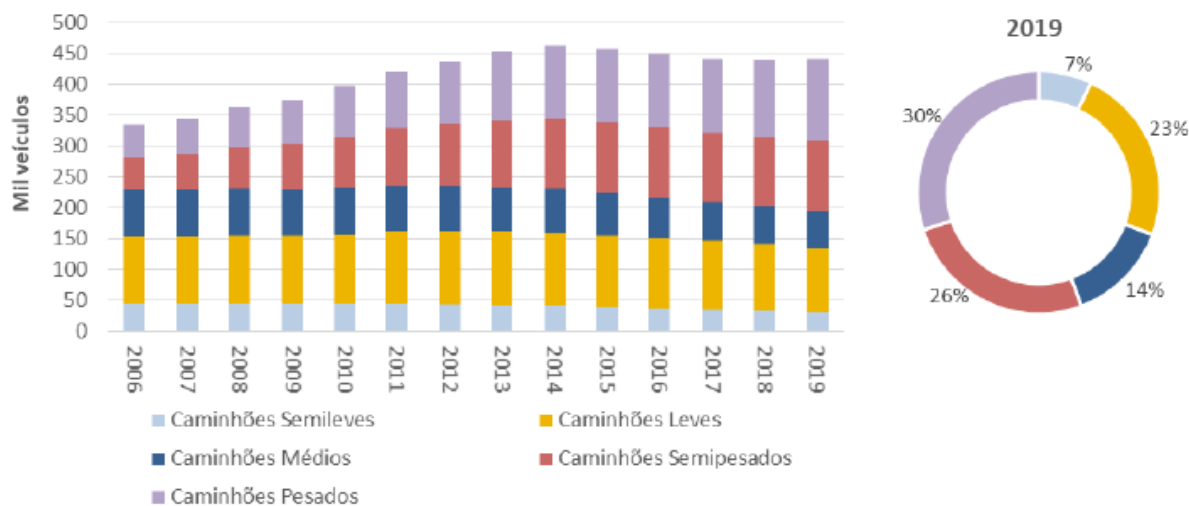


Gráfico 6 – Evolução da frota circulante de caminhões por subcategoria
Fonte: CETESB, 2019

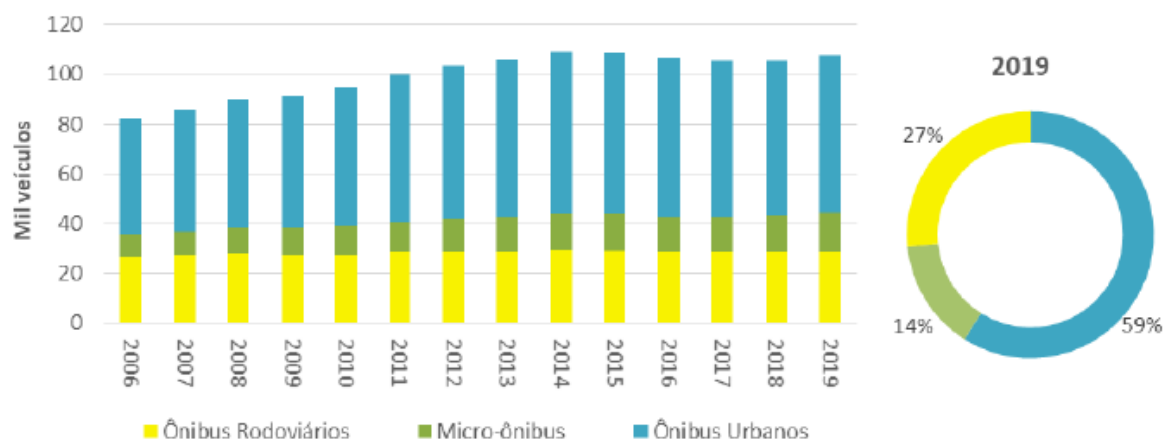


Gráfico 7 - Evolução da frota circulante de ônibus por subcategoria
Fonte: CETESB, 2019

Em 2018 e 2019, o CONAMA estabeleceu novos limites de emissões, mais restritivos, para todas as categorias de veículos. As novas fases L7 e L8 para veículos leves, P7 para veículos pesados.

Tabela 1 - Fator de emissão para Veículos Pesados com motores do ciclo Diesel
Fonte: CETESB, 2019. Modificado pelo autor.

Ano	Fase Proconve	Categoria	CO	HC	CH ₄	NOx	MP	N ₂ O	Consumo	
			(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(km/l)	
2015	P7	Caminhões	Semileves	0,044	0,007	0,06	0,528	0,004	0,03	9,1
			Leves	0,200	0,009	0,06	0,993	0,009	0,03	5,6
			Médios	0,091	0,009	0,06	0,986	0,009	0,03	5,8
			Semipesados	0,111	0,019	0,06	1,602	0,016	0,03	3,6
			Pesados	0,275	0,029	0,06	1,633	0,016	0,03	3,6
		Ônibus	Urbanos	0,530	0,021	0,06	2,710	0,024	0,03	2,1
			Micro-ônibus	0,085	0,026	0,06	1,385	0,010	0,03	3,3
2016	P7	Caminhões	Rodoviários	0,363	0,028	0,06	1,639	0,017	0,03	3,4
			Semileves	0,036	0,008	0,06	0,515	0,003	0,03	9,1
			Leves	0,172	0,012	0,06	0,994	0,008	0,03	5,6
			Médios	0,091	0,005	0,06	0,975	0,009	0,03	5,8
			Semipesados	0,124	0,011	0,06	1,469	0,014	0,03	3,6
		Ônibus	Pesados	0,292	0,033	0,06	1,690	0,016	0,03	3,6
			Urbanos	0,566	0,016	0,06	2,873	0,021	0,03	2,1
2017	P7	Caminhões	Micro-ônibus	0,072	0,012	0,06	1,303	0,010	0,03	3,3
			Semileves	0,030	0,004	0,06	0,484	0,003	0,03	9,1
			Leves	0,214	0,008	0,06	0,942	0,008	0,03	5,6
			Médios	0,102	0,012	0,06	0,906	0,008	0,03	5,8
			Semipesados	0,080	0,022	0,06	1,652	0,014	0,03	3,6
		Ônibus	Pesados	0,233	0,025	0,06	1,630	0,014	0,03	3,6
			Urbanos	0,462	0,024	0,06	2,645	0,021	0,03	2,1
2018	P7	Caminhões	Micro-ônibus	0,081	0,009	0,06	1,362	0,008	0,03	3,3
			Semileves	0,024	0,003	0,06	0,484	0,002	0,03	9,1
			Leves	0,230	0,009	0,06	0,875	0,009	0,03	5,6
			Médios	0,208	0,009	0,06	0,849	0,007	0,03	5,8
			Semipesados	0,099	0,017	0,06	1,593	0,014	0,03	3,6
		Ônibus	Pesados	0,289	0,023	0,06	1,598	0,014	0,03	3,6
			Urbanos	0,538	0,010	0,06	2,021	0,022	0,03	2,1
2019	P7	Caminhões	Micro-ônibus	0,122	0,008	0,06	1,421	0,008	0,03	3,3
			Semileves	0,015	0,003	0,06	0,512	0,002	0,03	9,1
			Leves	0,276	0,006	0,06	1,001	0,009	0,03	5,6
			Médios	0,203	0,009	0,06	0,829	0,008	0,03	5,8
			Semipesados	0,120	0,021	0,06	1,662	0,015	0,03	3,6
		Ônibus	Pesados	0,186	0,013	0,06	1,462	0,013	0,03	3,6
			Urbanos	0,434	0,023	0,06	2,610	0,023	0,03	2,1
		Ônibus	Micro-ônibus	0,154	0,008	0,06	1,472	0,008	0,03	3,3
			Rodoviários	0,250	0,019	0,06	1,544	0,014	0,03	3,4

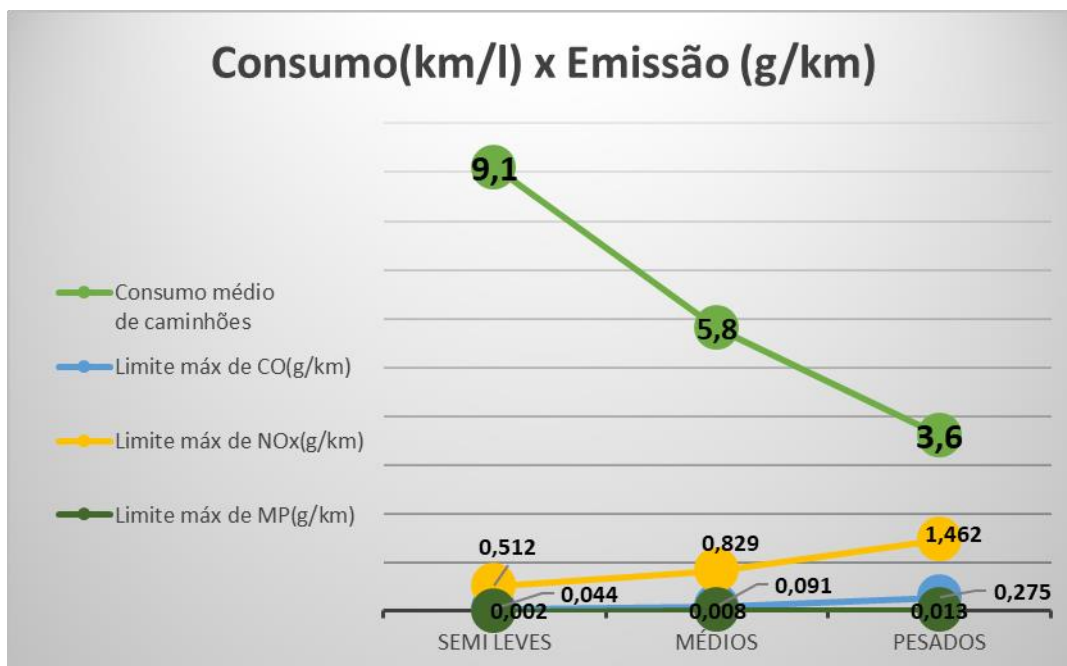


Gráfico 8 – Fator de emissão para Veículos Pesados com motores do ciclo Diesel
 Fonte: CETESB, 2019. Modificado pelo autor.

Na tabela 1 e no gráfico 8 observam-se o fator de emissão para ônibus e caminhões com motores do ciclo Diesel, conclui-se que existe uma interdependência da potência dos motores com relação a emissões de poluentes. Dessa forma, os limites de emissões de poluentes por quilometro rodado é maior para motores que exigem mais potência.

A Resolução Conama nº 491, de 19/11/2018 descreve poluente atmosférico como: “[...] qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde [...]” (CONAMA, 2021). A poluição do ar é determinada pela quantificação das substâncias tóxicas presentes no ar e deve ser monitorada e comparada para permanecer dentro dos limites estabelecidos pela legislação.

A tabela 2 abaixo mostra os poluentes que são considerados indicadores da qualidade do ar, assim como suas características e efeitos nocivos ao ambiente.

Tabela 2 - Principais poluentes na atmosfera, características, fontes e efeitos
Fonte: CETESB, 2021

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Inaláveis Finas (MP _{2,5})	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho < 2,5 micra.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Inaláveis (MP ₁₀) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), poeira ressuspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 50 micra.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Somente para caminhões e ônibus, no território brasileiro, veja no gráfico 9 abaixo, que a soma das emissões por veículos pesados (Diesel portanto) estão por volta de 100M de toneladas, que é significativamente maior que as emissões dos demais automóveis. Demonstra, portanto, o impacto ambiental que os veículos pesados representam no total de emissões.

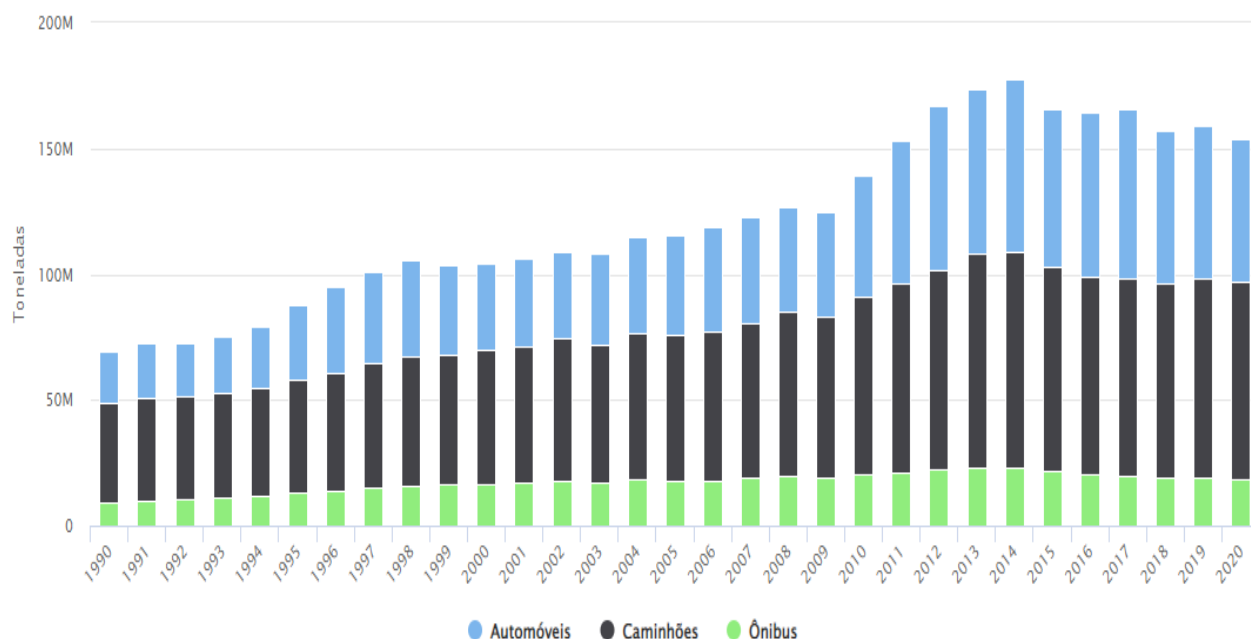


Gráfico 9 – Emissões por categoria de veículo
Fonte: SEEG, 2022

2.3 VEÍCULOS PESADOS MOVIDOS A ÓLEO DIESEL

Os motores de combustão interna usam combustível e a combustão para impulsionar seu movimento. Existem dois tipos principais de motores de combustão interna: motores de ignição por compressão e motores de ignição por faísca (*U.S. Department of Energy, 2013*). A maioria dos veículos pesados convencionais usam motores ignição por compressão enquanto veículos de passageiros usam motores de ignição por faísca. Ambos usam, na maioria dos casos, o ciclo de combustão de quatro tempos de ingestão, compressão, combustão e exaustão. No entanto, sua diferença está na forma de ignição do combustível e o tipo de combustível que eles usam, o que resulta em diferenças em termos de eficiência. Motores de ignição por compressão usam o calor do curso de compressão para inflamar o combustível, enquanto os motores de ignição por faísca usam velas de ignição (*DELL, Development of Road Vehicles with Internal-Combustion Engines, 2014*). Além disso, os motores de ignição por compressão usam diesel que tem 10 a 15% mais teor de energia do que a gasolina (*AFDC, 2021*) que é usada em motores de ignição por faísca. Os valores de compressão dos motores diesel são maiores, o que leva a maior eficiência devido a probabilidade de que as moléculas de ar reagir com as

moléculas de combustível são maiores. A maior densidade energética e maior eficiência tornou o motor diesel de combustível o mais popular até agora para veículos pesados.

Uma configuração simplificada do conjunto mecânico de motores a óleo diesel convencional envolve o motor, embreagem e transmissão. A transmissão converte a saída de torque do motor em rotações nos eixos. Este é um resultado de motores funcionando em rotações mais altas por minuto do que a médias dos veículos menores. A embreagem permite a desconexão entre a transmissão e o motor. O motor também está conectado a um alternador que transfere energia para uma bateria. Essa bateria é então conectada a acessórios elétricos e é também usada para dar partida ao motor.

As faixas convencionais de consumo de um veículo pesado podem variar dependendo da carga e combustível. A quilometragem média por litro de combustível para um caminhão é de cerca de 3 km/L (SCHOETTLE, *Survey of Fuel Economy and Fuel Usage by Heavy-Duty Truck Fleets*, 2016). Assim, como um caminhão pode normalmente transportar cerca de 680-1360 litros de combustível. A autonomia que isso permite é em torno de 1570-3140 quilômetros sem qualquer parada para reabastecer. No entanto, essa autonomia é altamente dependente da topologia, do tráfego, entre outros fatores. As taxas médias de fluxo de abastecimento são de 75 a 115 litros por minuto de diesel e a bomba resulta em um tempo de reabastecimento de um caminhão de 1360 litros de capacidade em cerca de 10-15 min (*H2@Ports Workshop Summary Report*, 2019).

A infraestrutura atual para veículos pesados diesel é altamente difundida e está disponível na maioria dos países. Atualmente, quase todo o mercado de veículos pesados roda com diesel convencional (ACEA, 2022). A demanda por combustíveis alternativos está aumentando para veículos pesados, mas os mercados de combustíveis alternativos ainda estão nos estágios iniciais.

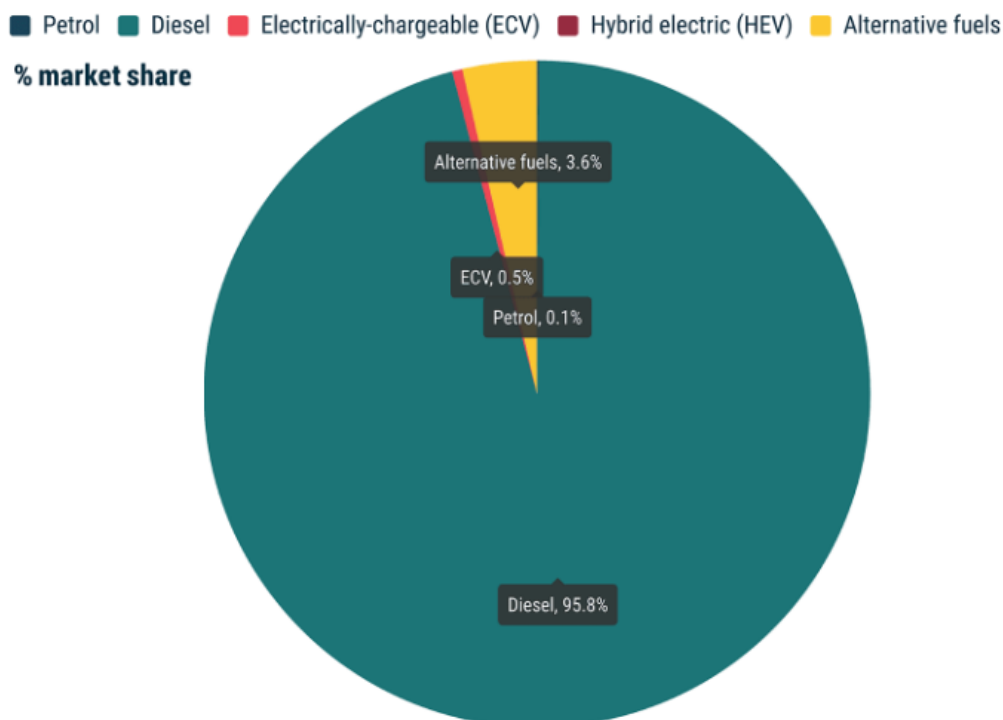


Gráfico 10 – Tipos de combustíveis em novos caminhões
Fonte: ACEA, 2022

Quanto à eficiência energética, motores diesel, do tanque até as rodas, são cerca de 23% (HUANG, *Energy efficiency analysis*, 2011). Isso significa que, da energia disponível no tanque de combustível, apenas 23% dele é usado como trabalho real, o resto sendo perdido devido ao calor e atrito.

2.4 USO DE MOTORES ELÉTRICOS EM VEÍCULOS PESADOS

Os veículos elétricos usam baterias para alimentar motores elétricos para sua propulsão. O tipo mais comum de bateria em veículos pesados são as de íon de lítio devido à sua alta densidade energética, alta eficiência e boa vida útil (MEVAWALLA, *One dimensional fast computational partial differential model for heat transfer in lithium-ion batteries*, 2021). Em seu nível mais básico, uma célula de bateria de íons de lítio consiste em um cátodo e ânodo de lítio, juntamente com uma solução separadora e eletrólito. Durante a descarga e carga, os íons de lítio são transportados pelo eletrólito do cátodo para o ânodo e vice-versa, respectivamente, através do separador, que gera uma corrente eletrônica. Todas as baterias devem necessariamente vir com um sistema de gerenciamento de baterias. Este sistema monitora o estado de carga da bateria, estado de saúde, estado de energia entre

outras funções (TRAN, *A Review of Lithium-Ion Battery Fault Diagnostic Algorithms: Current Progress and Future Challenges*, 2020). Este componente é vital para garantir uma operação segura e confiável do veículo.

O trem de força de um veículo elétrico consiste basicamente nos seguintes componentes: bateria, inversor e dos motores elétricos. Este trem de força é muito mais simples do que o de um caminhão diesel convencional, pois não há tantas peças mecanicamente móveis. Essa simplicidade é parte da razão pela qual os veículos elétricos têm custos de manutenção 20-30% menores quando comparados com veículos convencionais movidos a gás ou diesel (PELLETIER, *Battery Electric Vehicles for Goods Distribution*, 2014). Além disso, a maioria dos veículos elétricos também tem capacidades de frenagem regenerativa. Este sistema funciona capturando a energia cinética que normalmente seria desperdiçada ao frear em um veículo convencional (WEN, *Research on modeling and control of regenerative braking for brushless dc machines driven electric vehicles*, 2015). Na maioria dos outros veículos, a frenagem funciona pressionando pastilhas de freio em rotores ligados ao eixo, criando assim, atrito que desacelera o veículo, mas a energia cinética do carro é convertida em energia térmica nas pastilhas de freio e se transforma em forma de calor para o ambiente. A prática de frenagem regenerativa serve para ampliar o alcance de condução (autonomia) e reduzir o desgaste das pastilhas de freio convencionais.

O rendimento de uma bateria em um veículo pesado depende do tipo de bateria e peso do veículo. A autonomia da bateria para um veículo de carga é de cerca de 100 a 200 km com uma única carga (TRAN, *A Review of Range Extenders in Battery Electric Vehicles*, 2021). No entanto, o caminhão da Tesla afirma ser capaz de viajar 800 km com uma carga completa (EARL, *Analysis of long haul battery electric trucks in EU*, 2018). Segundo o site da Tesla, os custos de energia elétrica são metade dos do diesel. Com menos sistemas para manter, o Tesla Semi fornece cerca de US\$ 200.000 em economia de combustível e um período de retorno de investimento de dois anos. Os preços variam de US\$150.000 a US\$180.000 (Tesla, 2022).



Figura 12 – Tesla Semi
Fonte: Tesla, 2022

As principais preocupações são o peso da bateria em relação à capacidade exigida com os veículos de carga. Uma bateria mais pesada é necessária para distâncias mais longas, o que exigiria maior energia e saída de energia. Para um alcance de 800 km, a capacidade da bateria necessária seria de cerca de 1000 kWh de energia que exigiria pelo menos 5500 kg dedicados à bateria com as densidades de energia atuais (KALGHATGI, *Applied Energy*, 2018).

O tempo de recarga da bateria para um veículo elétrico pesado depende do tipo de carregador e da capacidade de carregamento. Um caminhão precisaria de um carregador que pode produzir potência superior a 25 kW. Nesta capacidade de saída de energia, o tempo de recarga seria em torno de 20 horas para uma bateria de 1000 kWh. No entanto, com capacidade de as saídas de energia em 1 MW, o tempo de recarga poderia teoricamente ser reduzido para 1 hora. O carregamento rápido tem implicações negativas em relação à degradação, pois o carregamento mais rápido pode resultar em uma menor vida útil geral da bateria (HAN, *ETransportation*, 2019). A tecnologia atual tem a capacidade de carregar a 50 kW (LAMBERT, *Electrek*, 2021). As emissões de escapamento de um veículo pesado de bateria, como em qualquer veículo de emissão zero, são zero. Entretanto, a infraestrutura atual para veículos pesados de bateria é ainda limitada. A Tesla anunciou em 2017 que planeja implementar uma rede de carregadores rápidos para o próximo “Tesla Semi”. O carregador denominado “*megacharger*” entregaria mais de 1 MW de potência para que o Tesla Semi pudesse ser carregado em um período relativamente curto de tempo (LAMBERT, *Electrek*, 2021). No entanto, a partir de

2020, nenhum desses “*megachargers*” foi implantado publicamente. Estima-se que uma instalação de carregador custaria entre US\$ 17.000 e US\$ 32.000 para um carregador de 16,5 kW de baixa potência, com preços subindo entre US\$ 150.000 e US\$ 200.000 para um carregador mais poderoso de 450 kW como demonstra a tabela abaixo (GALLO, *World Electr. Veh*, 2016).

Tabela 3 - Caminhões e ônibus elétricos, custo estimado da infraestrutura de carregamento
Fonte: *World Electr. Veh*, 2016. Modificado pelo autor.

Capacidade de carregamento	Custo estimado por infraestrutura de carregamento	
	Mínimo (US\$)	Máximo (US\$)
16,5kW (220V/75A)	17.000	32.000
70kW (208VAC /200A)	20.000	75.000
450kW (480VAC/64A)	150.000	200.000

Devido à pouca quantidade de veículos pesados a bateria atuais no mercado, houve pouca implantação de infraestrutura até agora. No entanto, há um número crescente de estações regulares de carregamento de veículos elétricos que foram instaladas em toda a América do Norte (*Alternative Fuels Data Center*, 2021) que podem potencialmente ser equipadas para veículos pesados. Isso certamente levará muito mais tempo e consumirá muito mais energia nas recargas devido às maiores capacidades de bateria necessárias em veículos pesados.

A eficiência global um veículo elétrico é em média em torno de 68% (WEI-DONG HUANG, *PLOS ONE Journals*, 2011). As perdas são devido ao atrito no trem de força, e às resistências elétricas no caminho que percorre a eletricidade. Isso varia dependendo do tipo de bateria e das resistências elétricas envolvidas. A energia específica de uma bateria lítio depende do design e características, mas elas variam de 120-220 Wh/kg (SHEIN, *Energy Storage Mater*, 2018). A vida útil de uma bateria em veículos elétricos pesados é de cerca de 6 anos ou 1000 a 2000

ciclos de recarga devido à degradação da bateria (MOULTAK, *International Council on Clean Transportation*, 2017). Isso é frequentemente definido como o tempo que leva para a capacidade da bateria atingir 70-80% da capacidade original (SAXENA, *J. Power Sources*, 2015). No entanto, essa vida útil depende da temperatura, tipo de aplicação entre outros fatores (MEVAWALLA, *Mathematical Heat Transfer Modeling and Experimental*, 2020). Para competir com os motores diesel convencionais, o objetivo dos veículos elétricos é atingir uma vida útil de mais de 10 anos.

2.5 CÉLULA DE COMBUSTÍVEL NO TRANSPORTE PESADO

2.5.1 Fundamentos da célula de combustível

O cientista físico William Grove, denominado o “Pai da Célula de Combustível”, é considerado o pioneiro da tecnologia de células de combustível. Em 1839, portanto, ele determinou que a eletricidade poderia ser gerada revertendo a eletrólise da água. Apesar do avanço inicial, o termo “célula de combustível” só foi cunhado em 1889 por Charles Langer e Ludwig Mond. Os dois pesquisadores tentavam projetar a primeira célula de combustível eficaz usando gás de carvão e ar. Mais progressos tecnológicos tentativas foram feitas até o início de 1900 (*Fuel cells: History and updating*, Andújar JM, 2009). O engenheiro inglês Francis Thomas Bacon desenvolveu a primeira célula de combustível totalmente operacional em 1932. Este modelo inicial foi alimentado por puro O_2 e H_2 , eletrodos de níquel usados e um catalisador alcalino. Foi preciso para Bacon e seus colegas, mais 37 anos para implementar essa célula de combustível em um dispositivo de 5kW. Um pouco antes, em 1957, um outro dispositivo de célula de combustível foi apresentado: era um trator de 20 CV desenvolvido por Harry Karl Ihrig. A NASA começou a pesquisar a tecnologia na mesma época. O alcance deles era desenvolver um gerador de eletricidade compacto para uso em naves espaciais (*Fuel cells: History and updating*, Andújar JM, 2009).

O principal método de classificação das células de combustível é o tipo de eletrólito utilizado, que afeta a temperatura operacional da célula de combustível. Acima de $600^{\circ}C$ as células de combustível são classificadas como células de combustível de “alta temperatura” (*Effect of bipolar plate materials on performance of*

fuel cells, 2018). Sob essas condições de trabalho, os hidrocarbonetos transformam-se em hidrogênio e promovem eficientemente as reações eletroquímicas sem a necessidade de um catalisador. Como desvantagem, a eficiência é inversamente proporcional à temperatura de reação, o que significa que acima de certos limites de temperatura a liberação de energia é muito afetada. As células de combustível de alta temperatura que valem a pena citar são:

- Carbonato fundido
- Óxido sólido

As células de combustível que operam abaixo de 250°C são classificadas como células de combustível de “baixa temperatura”. Essas células requerem um catalisador e uma fonte externa de hidrogênio (*Chemical Engineering Journal*, 2014). As faixas de temperatura mais baixas permitem tempos de inicialização mais curtos e não prejudicam o material durante o uso. Esses dois fatores tornam a célula de combustível de baixa temperatura particularmente atraente para aplicações automotivas. As células de combustível de baixa temperatura mais promissoras são:

- Alcalina
- Ácido fosfórico
- Membrana de Troca de Prótons (PEM)

2.5.1.1 Princípio de funcionamento da célula de combustível

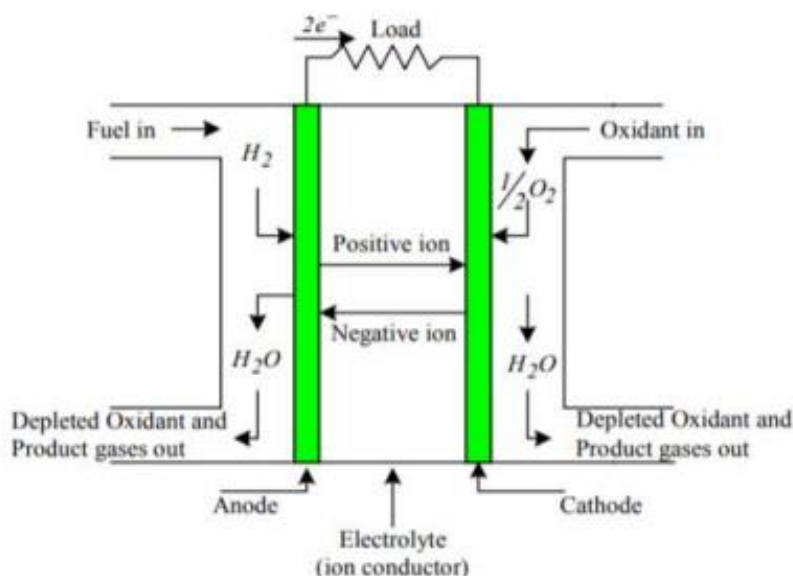


Figura 13 - Diagrama do princípio de funcionamento da célula de combustível
 Fonte: *The PEM Fuel Cell System, 2009*

Existem vários tipos de sistemas de baterias de célula de combustível. No entanto, o princípio de sua função é semelhante. Para um sistema de célula de combustível, são necessários três pilares: um ânodo, um cátodo e um eletrólito. As células de combustível são categorizadas pelo tipo de material eletrolítico usado. Uma célula combustível pode ser composta de centenas de células individuais, mas cada uma tem os mesmos três componentes fundamentais. O eletrólito está localizado entre o cátodo e o ânodo. A Figura 13 mostra um esquema de um diagrama de operação de eletrólito de polímero (KIRUBAKARAN, *The PEM Fuel Cell System, 2009*). Este tipo de célula de combustível também é conhecido como membrana de troca de prótons. O eletrólito de polímero é o mais utilizado em aplicações de energia móvel, como em veículos. Embora o material do eletrólito usado varie dependendo do tipo de célula de combustível, a função geral da célula de combustível é a seguinte: combustível (hidrogênio) é alimentado no compartimento do ânodo da célula de combustível enquanto ar ou oxigênio é alimentado no lado do cátodo da célula de combustível. No lado do ânodo da célula, os elétrons são separados à medida que o gás tenta atravessar a membrana eletrolítica. A membrana atua como um filtro para separar os elétrons e os íons de

hidrogênio, permitindo apenas a passagem dos íons de hidrogênio. No compartimento catódico, os íons de hidrogênio que passaram pela membrana combinam-se com os átomos de oxigênio do suprimento de ar para produzir H_2O como subproduto, calor também é produzido como subproduto (O'HAYRE, *Fuel Cell Fundamentals*, 2016). Ao contrário dos motores de combustão interna, onde o combustível é misturado com ar e combustível, há separação do combustível e do oxidante sem combustão do combustível em uma célula de combustível. Portanto, as células de combustível não produzem as emissões nocivas que os motores de combustão interna produzem.

As células a combustível de hidrogênio são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química em eletricidade, calor e água. Os motores de combustão interna a hidrogênio para aplicação veicular destinam-se a fornecer uma potência, dirigibilidade, alcance e segurança como nos veículos de combustível convencional. No entanto, principalmente devido aos desafios do hidrogênio a bordo, como os perigos de ter a bordo um local de armazenamento de hidrogênio em forma líquida, pode ser preocupante para um eventual acidente.

Existem várias formas de separar o hidrogênio a partir da sua forma natural. Para serem utilizados como combustível para veículos, necessita de um processo que consome grande quantidade de energia. Como vemos na figura 14, o melhor caso para utilização em veículos é o hidrogênio verde, onde seu processo de produção é derivado da eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/hídrica/solar).

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Notas: 1 - Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono 2 - CCUS - *Carbon Capture, Utilization and Storage*. 3 - A hulha possui entre 69 e 86% de carbono 4 - Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

Figura 14 – Classificação de diferentes processos de produção do hidrogênio
Fonte: EPE, 2022

A necessidade de disponibilidade imediata de hidrogênio para motores de combustão, um amplo conhecimento na produção de motores, durabilidade e manutenção, bem como a capacidade de motores de combustão para funcionar tanto com hidrogênio quanto com combustíveis convencionais, eles são considerados uma barreira tecnológica para uma infraestrutura de hidrogênio em todo um território visando o lado comercial (VERHELST, *Hydrogen-fueled internal combustion engines*, 2019). Veículos com motor de combustão interna a hidrogênio podem ser considerados um primeiro facilitador para ajudar a estabelecer e expandir uma infraestrutura de hidrogênio e sensibilização do público para expandir essa tecnologia.

Numerosos veículos movidos a hidrogênio, desde veículos de duas rodas a carros de passeio, picapes a ônibus e veículos utilitários foram projetados, construídos e testados nas últimas décadas. Em veículos pesados, portanto, como por exemplo tem-se em 2004 um dos primeiros ônibus desenvolvido para testes.

Tabela 4 - Ford Shuttle Bus

Fonte: S. Verhelst, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009. Modificado pelo autor.

Nome	Ano	Motor	Capacidade	Autonomia
<i>Ford Shuttle Bus</i>	2004	6,8L V10	26,9Kg	240-320km

Para demonstrar uma aplicação comercialmente viável para veículos movidos a hidrogênio, a Ford projetou totalmente uma frota de demonstração de 30 unidades de um ônibus com motor de 6,8 L que funciona com hidrogênio. O ônibus de transporte de 8 a 12 passageiros com distância entre eixos de 4,5 m e peso bruto estimado do veículo de 6.373 kg é equipado com um sistema de armazenamento de hidrogênio comprimido a bordo que suporta até 29,6 kg de hidrogênio a uma pressão de 350 bar que resulta em um alcance de 240 a 320 km.

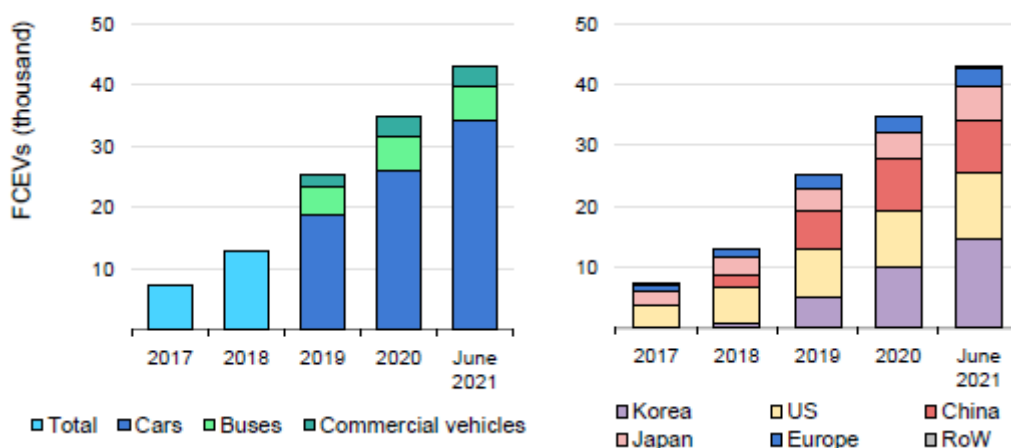
**Figura 15 - Ford Shuttle Bus**

Fonte: *Quantum Fuel Systems Technologies Worldwide*, 2007

O foco no hidrogênio é positivo do ponto de vista de desenvolvimento de novas tecnologias. No entanto, outros caminhos promissores e necessários serão implementados a curto prazo para melhorar a economia de combustível e reduzir as emissões. Apesar de, muitas das vezes, as questões das emissões não são prioridade para os projetos no ramo automobilístico.

2.5.2 Melhorias recentes na tecnologia da célula combustível elétrica em veículos pesados

Recentemente, os veículos elétricos movidos a células de combustível têm apresentado crescimento, embora ainda baixo em número, enquanto comparado com os veículos elétricos a bateria. No gráfico 11, mais de 40000 veículos elétricos a célula de combustível estão registrados globalmente até junho de 2021 (IEA 2021). Com crescimento de cerca de 70% anual entre 2017 e 2020 caindo para 40% certamente em virtude da pandemia. Destaque para esse levantamento é que a maioria dos veículos são carros e apenas 5 modelos de caminhões estão disponíveis no mercado. Porém, há perspectiva de ter 11 modelos até 2023. Grandes empresas como IVECO, OMV e Shell estão comprometidas para colaborar com esse desenvolvimento.



Notas: FCEV = *fuel cell electric vehicle* (veículo a célula combustível). RoW = *rest of world* (Resto do mundo). *Thousand* (Milhares).

Gráfico 11 – Veículos elétricos a célula de combustível por segmento e região 2017 – junho/2021

Fonte: EIA, 2021

As células de combustível apresentam a desvantagem de menor densidade de potência e menor resposta de potência em comparação com outras fontes de potência. Assim, Hames, no estudo da análise das estratégias de controle para economia de combustível em veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio (HAMES, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2018), desenvolveu uma estratégia onde baterias, capacitores e sistemas de armazenamento de energia são usados em

conjunto com células de combustível para mitigar as desvantagens das células de combustível, mantendo a vantagem de ser uma fonte de combustível sustentável. Além disso, a combinação de vários sistemas de armazenamento de energia permite que o veículo manuseie várias situações, como através do compartilhamento de energia entre os sistemas.

Por meio de modelagem, Macauley no estudo sobre o modelo de vida útil da membrana empírica para serviços pesados em sistemas de células de combustível (MACAULEY, *J. Power Sources*, 2016) previu com sucesso a vida útil da membrana da célula de combustível dentro de 20% do seu tempo real operacional. A abordagem apresentou um aperfeiçoamento, previu uma vida útil de 17500 horas e chegou à falha em 18900 horas de operação. Seu modelo levou em conta a voltagem da célula, temperatura, concentração de oxigênio e ciclo de umidade para determinar a vida útil de uma célula de combustível para serviço pesado para uma frota de ônibus de Whistler no Canadá.



Figura 16 – Ônibus a célula de combustível Whistler
Fonte: THEGLOBEANDMAIL, 2013

Com a popularidade de células de combustível de hidrogênio, uma revisão da literatura sobre os dias atuais sobre a infraestrutura necessária e perspectivas relacionadas com o hidrogênio foi demonstrada em um estudo divulgado por Apostolou em 2019 (*Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2019). Onde diz que, atualmente, existem cinco principais métodos de produção de hidrogênio disponíveis, como eletrólise, carvão, óleo, gás natural e biomassa. Para acomodar a crescente popularidade dos veículos movidos a hidrogênio, os postos de abastecimento devem

ser construídos e compostos por uma unidade de produção, unidade de purificação, compressor, armazenamento tanques, unidade de refrigeração entre outros itens.

Em uma avaliação do espaço de armazenamento de hidrogênio a bordo em caminhões pesados de serviço e elétricos de célula de combustível (GANGLOFF, *Design Space Assessment of Hydrogen Storage Onboard Medium and Heavy Duty Fuel Cell Electric Trucks*, 2017), foi avaliado o espaço dos tanques de armazenamento de hidrogênio e a eficiência do hidrogênio comparado aos veículos convencionais. A tecnologia de hidrogênio de última geração usa gás comprimido a 350-700 bar e 50 a 80 kg de hidrogênio. Como a eficiência de 1 kg de hidrogênio é quase equivalente a 1 galão (aproximadamente 3,785 litros) de combustível convencional, os tanques de hidrogênio atuais têm autonomies semelhantes aos veículos convencionais.

Para estimar a autonomia disponível de um veículo de célula de combustível, existem várias equações que estimam a autonomia de um caminhão a hidrogênio e elétrico de célula de combustível (CHANDRASEKAR, *A Novel Approach on Range Prediction of a Hydrogen Fuel Cell Electric Truck*, 2021).

Em um projeto que visava caminhões médios e pesados elétricos de célula de combustível de hidrogênio no mercado, investigaram a viabilidade de acionamentos de células a combustível de hidrogênio através da avaliação do espaço físico dentro de caminhões médios a pesados disponível para células de combustível de hidrogênio. Vários modelos reais foram usados para determinar os espaços e concluiu que a maioria dos caminhões não representa uma restrição de tamanho no armazenamento de combustível de hidrogênio armazenado em 350 bar a 700 bar (KAST, *Designing hydrogen fuel cell electric trucks in a diverse medium and heavy duty market*, 2018).

3. DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS ALIMENTADOS A DIESEL, BATERIA E CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.

Com base nas características dos acionamentos de veículos pesados abordados neste trabalho, pode-se extrair uma comparação entre eles e discorrer sobre suas vantagens e desvantagens.

Os critérios que são comparados na Tabela 5 para os três tipos de acionamentos em veículos pesados são: as emissões no escapamento, a eficiência, o consumo de combustível, a autonomia, o tempo de reabastecimento/recarga. As emissões do escapamento são as emissões liberadas devido ao trabalho no motor do veículo.

As emissões para gerar o hidrogênio das células de combustível e eletricidade para alimentar as baterias não foram consideradas na comparação. Ademais, importante observar que essa comparação é para um caso isolado que faz sentido na localidade onde foi avaliada, os custos de produção do H₂ e custo da energia elétrica depende de cada região e pode mudar a interpretação dessa comparação.

A eficiência do processo leva em conta a partir do sistema de armazenamento de energia dentro do veículo (como o tanque de combustível) até que ele é convertido em energia mecânica nas rodas. O consumo de combustível é a distância que pode ser percorrido por unidade da fonte de energia. A autonomia é um cálculo da distância que pode ser percorrida por um determinado caminhão para cada tipo de tecnologia. O tempo de reabastecimento/recarga é o tempo que leva para o sistema de armazenamento de energia atender à sua capacidade máxima.

Tabela 5 - Comparação entre os três motores em veículos pesados
Fonte: Modificado pelo autor

Critério	Diesel	Bateria	Célula de combustível
Emissões	Sim	Não	Não
Eficiência	23%	68%	45%
Consumo	3 km/l	0,8km/kWh	11km/kg H ₂
Autonomia	1570-3000 km	100-800 km	1000-1770 km
Tempo de reabastecimento/recarga	10-15 min	3-20 h	10-20 min
Custo estimado a cada 1000 km (US\$)	\$445	\$187	\$1500

Na tabela 5 acima, a autonomia depende do combustível ou da fonte de energia, que também depende do valor estabelecido no projeto do fabricante e eficiência estimada (HUANG, *Energy efficiency analysis*, 2011). Para o diesel, foi baseado em aproximadamente 570-1130 litros de diesel combustível (SCHOETTLE, *A Survey of Fuel Economy and Fuel Usage by Heavy-Duty Truck Fleets*, 2016), o que é comum para essa categoria de veículo. Para a bateria, foi calculado para um evento de 100 km percorrido e uma bateria de 1000 kWh (KALGHATGI, “*Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?*”, 2018). Para células de combustível, foi calculado para 120 kg de hidrogênio a bordo (KAST, *Clean commercial transportation*, 2017). O tempo de reabastecimento do diesel foi calculado a partir de uma vazão de aproximadamente 95 litros/minuto e uma capacidade de 570-1130 litros.

O tempo de carregamento depende da infraestrutura e esses números representam uma média real. Este cálculo assumiu um carregador de 50-350 kW (AFDC, 2022). O fluxo para uma bomba em um posto de combustível a diesel é de aproximadamente 115 litros por minuto (JEFF HANSEN, *FUEL TRANSFER PUMP UNIT*, 2022). Tempo de reabastecimento para um veículo a célula de combustível de hidrogênio é calculado para 100 kg de hidrogênio e uma taxa de fluxo máximo de até 20 kg/min (*National Renewable Energy Laboratory*, 2022).

Quanto aos custos totais dos veículos, como demonstra a tabela 6 abaixo, no estudo de caso realizado na Califórnia por Burke (BURKE, *Technology*,

Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and Buses in 2020–2040, 2020) descobriu-se que os veículos pesados eletrificados tinham maior custo total em comparação com os veículos pesados diesel na maioria dos cenários. Os veículos pesados elétricos mostraram ter o maior custo do veículo dos três. Os de células de combustível, foram os mais promissores em relação a autonomia.

Os custos totais de veículos pesados de bateria e célula de combustível de hidrogênio poderão ser competitivos com motores diesel se o preço das baterias e células de combustível cair para cerca de US\$ 100 /kWh para ambas as tecnologias. Este preço baixo pode potencialmente ocorrer nos próximos 10 a 20 anos à medida que mais avanços tecnológicos são feitos para melhorar essas duas tecnologias. Os veículos a célula de combustível têm a maior eficiência, porém, têm maior tempo de reabastecimento na bomba em relação aos que são movidos a diesel.

O custo estimado a cada 1000 quilômetros rodados para o diesel é de US\$ 445 (*GlobalPetrolPrices*, 2022), o custo de energia elétrica para bateria é de cerca de US\$ 187 (EIA, 2022) o veículo pesado com o melhor custo por quilômetro rodado entre os três, já o custo para célula combustível é de aproximadamente US\$ 1500 para o mesmo trecho (CAFCEP, 2022). Evidente que esse custo para célula combustível seria menor caso ele fosse algo produzido em larga escala.

Os veículos com motores a célula combustível são comparáveis ao diesel no tempo de reabastecimento. A eficiência total, é comparável entre elétricos e célula de combustível e ambos são significativamente maiores do que a eficiência total dos a diesel. Além disso, a maior autonomia de veículos a célula combustível poderia dirigir para distâncias semelhantes em relação aos veículos de menores capacidades a diesel com menos peso a bordo devido à sua alta energia específica, sendo o hidrogênio um combustível mais leve. Veículos elétricos ficam aquém no que diz respeito a tempo de recarga e a autonomia em comparação com diesel e de células de combustível.

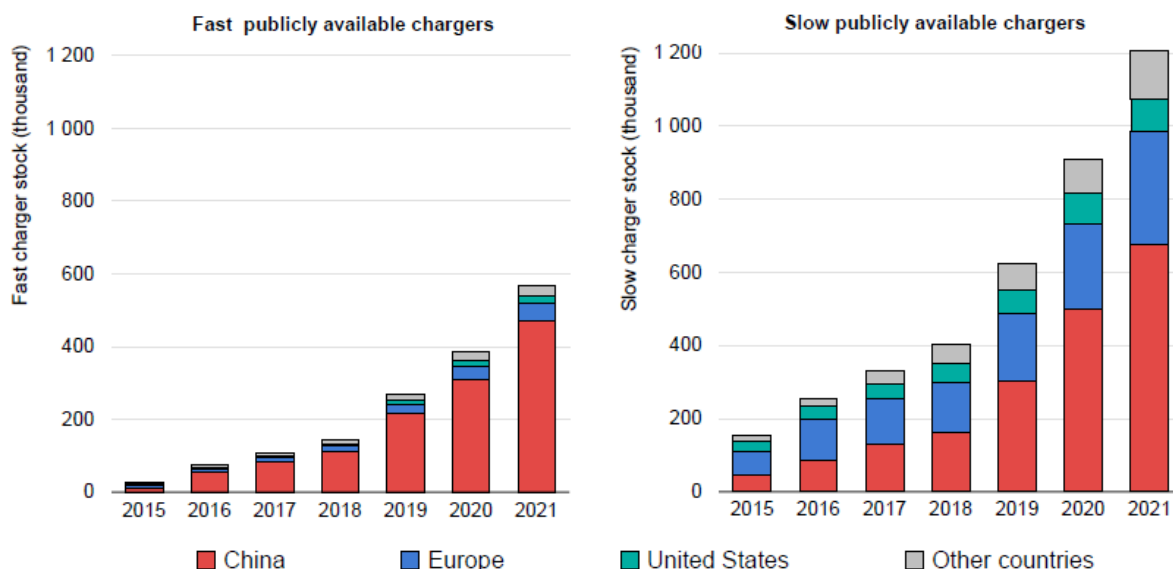
O custo total do veículo é o custo médio da vida inteira de um veículo pesado estimado, ou seja, o custo da aquisição somado aos gastos com combustível e manutenção. Um estudo de caso feito na Califórnia em 2020 no *National Center for Sustainable Transportation* (BURKE, *Technology, Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and*

Buses in 2020–2040, 2020), demonstra uma comparação em veículos pesados de características semelhantes, porém com tecnologias diferentes. Esses valores são bons indicativos de porque o veículo a Diesel, domina amplamente o mercado na atualidade.

Tabela 6 - Custo total
Fonte: Modificado pelo autor

Veículo	Custo total (US\$)	Custo total (R\$) *set/2022
Diesel	\$119.000 – \$134.000	R\$624,750 - R\$703,500
Bateria	\$164.641 – \$585.000	R\$864,365 - R\$3,071,250
Célula de combustível	\$135.503 – \$249.000	R\$711,390 - R\$1,307,250

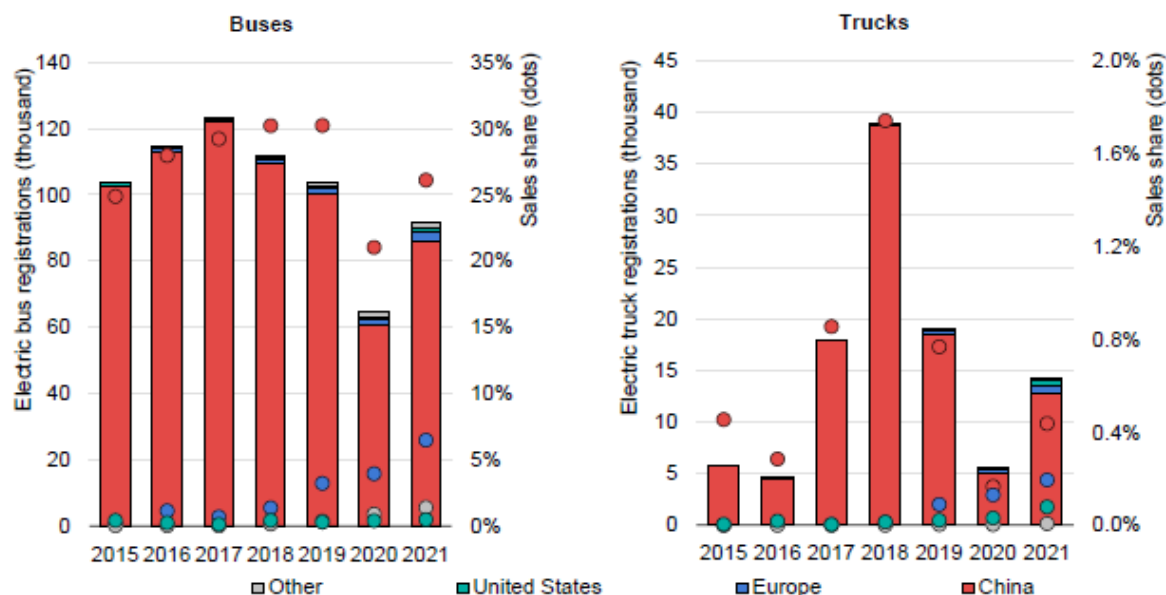
O gráfico 12 apresenta um crescimento nos números de pontos de carregamento públicos, o que é natural tendo em vista o aumento do mercado dos veículos elétricos. Uma grande vantagem para os modelos elétrico é a capacidade de obter um ponto de recarga em sua residência e não depender de um carregamento público. Os veículos elétricos a bateria tem como vantagens maior eficiência, emissões menores e custos de manutenção mais baixos que os movidos a diesel e infraestrutura mais barata do que a tecnologia de células de combustível. No entanto, as desvantagens são, maior custo dos veículos, custos de infraestrutura mais altos do que os movidos a diesel, autonomia limitada e têm carga limitada devido ao peso e tamanho das baterias.



Notas: *Fast charger* (Carregamento rápido); *Slow charger* (Carregamento lento); *Thousand* (Milhares).

Gráfico 12 – Pontos públicos para carregamento de carros elétricos, 2015-2021
Fonte: EIA, 2022

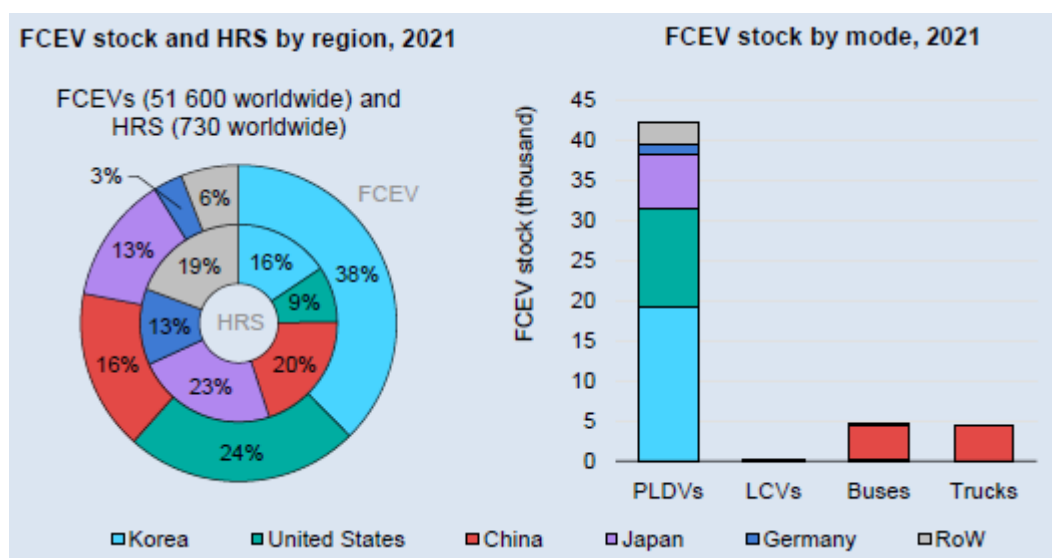
Em 2021, como observa-se no gráfico 13, o estoque global de ônibus elétricos era de 670.000 de veículos elétricos pesados e de caminhões foi de 66.000. Isso representa cerca de 4% da frota de ônibus e 0,1% para caminhões pesados a nível global.



Notas: *Buses* (Ônibus); *Trucks* (Caminhões); *Thousand* (Milhares).

Gráfico 13 - Registros de ônibus e caminhões elétricos por região, 2015-2021
Fonte: EIA, 2022

Em relação à tecnologia de células de combustível, as vantagens em relação aos veículos movidos a diesel são ausência de emissões e maior eficiência enquanto com relação as baterias apresentam melhor tempo de reabastecimento, e maior densidade de energia. No entanto, os veículos a célula de combustível atualmente têm os custos mais altos, os requisitos de desenvolvimento de infraestrutura mais elevados e o desenvolvimento e incentivo tecnológico mais lento, como visto em pesquisa da IEA 2021, onde apenas 5 modelos de caminhão estavam em circulação em 2021, enquanto os veículos leves representam cerca de 80% da frota total. Destaque para a China, no gráfico 14, que tem a maior frota de ônibus e caminhões a célula de combustível, com uma frota de mais de 8400 veículos. A china responde, a nível mundial por quase 90% dos ônibus a célula de combustível e 95% dos caminhões (EIA, 2022).



Notas: FCEV = *fuel cell electric vehicle* (veículo a célula de combustível); RoW = *Rest of world* (Resto do mundo); *Thousand* (Milhares); HRS = *hydrogen refuelling station* (estação de reabastecimento de hidrogênio); PLDVs = *passenger light-duty vehicles* (veículos de passeio); LCVs = *light commercial vehicles* (veículos comerciais leves); *worldwide* (globalmente).

Gráfico 14 – Quantidade de veículos a célula de combustível elétricos 2021

Fonte: IEA, 2022

A tabela 7 abaixo, mostra uma análise mais qualitativa das vantagens e desvantagens dos motores. As vantagens dos veículos com motor diesel são que eles têm o menor custo e são a tecnologia de combustível e motor mais amplamente disponível para veículos pesados. Não seria necessária nenhuma infraestrutura

adicional. No entanto, as desvantagens são que eles emitem grande quantidade de gases de efeito estufa e não são muito eficientes em termos energéticos.

Tabela 7 - Vantagens e desvantagens das três tecnologias
Fonte: Modificado pelo autor

Fonte de energia	Vantagens	Desvantagens
Diesel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menor custo total do veículo. 2. Não é necessário investimento em infraestrutura. 3. Longa autonomia e alta capacidade de carga. 4. Rápido tempo de reabastecimento. 5. Mercado com peças e veículos amplamente disponíveis. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Altas emissões de gases de efeito estufa (produção do diesel) 2. Alta poluição atmosférica local (escapamento). 3. Alto custo de reabastecimento e manutenção. 4. Baixa eficiência energética.
Bateria	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduz as emissões de gases de efeito estufa (dependendo da energia primária). 2. Reduz a poluição atmosférica local (sem emissões de escapamento). 3. Menores custos de reabastecimento e manutenção. 4. Boa eficiência energética. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necessidade de investimento em infraestrutura. 2. Maior custo total do veículo em relação ao diesel. 3. Alto tempo de recarga. 4. Baixa autonomia por recarga. 5. Peso e tamanho de carga limitados devido à bateria grande e pesada.
Célula de combustível de hidrogênio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduz as emissões de gases de efeito estufa. 2. Reduz a poluição atmosférica local (escapamento). 3. Boa eficiência energética. 4. Bom tempo de reabastecimento. 5. Boa autonomia por reabastecimento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto custo de obtenção e distribuição do hidrogênio. 2. Alta necessidade de desenvolvimento de infraestrutura. 3. Maior custo total do veículo em comparação com diesel ou bateria. 4. Pesquisa e desenvolvimento lento e pouco incentivo das grandes empresas.

4. CONCLUSÃO

Os veículos pesados, são um dos principais contribuintes para emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao transporte, muitos laboratórios e grupos empresariais estão trabalhando para mitigar as emissões em todo o setor de transporte de cargas e passageiros. Vale ressaltar que os veículos pesados a diesel serão sim uma tecnologia ainda muito explorada e muito importante para esse segmento, irá cumprir o seu papel social na evolução da sociedade e garantir empregos para diversas famílias que trabalham para toda a indústria que se construiu ao entorno do diesel e sua tecnologia.

A maioria dos veículos pesados hoje em dia usa motores a diesel devido à sua maior eficiência energética em relação a gasolina. No entanto, muitos tipos de emissões ainda ocorrem durante a combustão do diesel, como o CO₂ e material particulado (MP). Logo, a proposta de veículos pesados de menor emissão e emissão zero considerou o emprego de motores elétricos e motores a célula de combustível a hidrogênio como alternativas aos motores diesel.

Ao longo desse estudo, uma comparação entre as três tecnologias também foi discutida com as perspectivas futuras do setor de veículos pesados. Os motores diesel permanecerão uma tecnologia importante no futuro de curto e médio prazo e continuarão a serem vantajosos devido a infraestrutura já existente e caminhões disponíveis em todo o mundo, que resultam em menores custos. Por outro lado, eles ainda emitem muitos gases poluentes e de efeito estufa. Veículos pesados elétricos a bateria tem grande vantagem devido as suas emissões zero e alta eficiência, desvantagem em características da própria bateria que limita a carga transportável e a autonomia por recarga. Veículos pesados a célula de combustível são vantajosos devido às suas emissões zero e autonomies comparáveis aos caminhões a diesel, vale ressaltar a importância desse hidrogênio ser um hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis de energia. No entanto, falta infraestrutura e requer alto investimento para sua implementação. Por causa da complexidade do setor de transporte de cargas pesadas, um conjunto de tecnologias mais limpas, serão necessárias para a descarbonização a curto, médio e longo prazo e será importante para saber o melhor caminho em determinado contexto social, econômico e que atenda as emissões permitidas visando a preservação dos nossos recursos e qualidade de vida.

Suportar à inovação garante engajamento e possibilita as tecnologias atingirem a comercialização, como por exemplo, criar grandes incentivos fiscais para utilização energia com baixa emissão de carbono. É importante que os departamentos governamentais que gerenciam o portfólio de pesquisas e desenvolvimento priorizem laboratórios relacionados as pesquisas sobre hidrogênio e baterias de lítio. Cooperação internacional será fundamental nessa jornada, os programas devem ser alavancados pelas esferas governamentais com objetivo de facilitar o intercâmbio de informações e progresso mútuo.

Como sugestão de pesquisa para o futuro seria melhorar o processamento dos gases que os veículos emitem antes de ir para o meio ambiente com tecnologias que já existem, mitigando ainda mais a emissão antes do escapamento. No tocante as baterias, seria maximizar a densidade de carga da bateria para obter mais autonomia e diminuir o peso dos veículos, permitindo mais carga (peso) transportável. Por fim, para a célula de combustível, seria encontrar maneiras de reduzir os custos das células e produzir, armazenar e distribuir hidrogênio com segurança e a baixo custo, expandindo para outras aplicações além da veicular.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKAREEM MA, MASDAR MS, TSUJIGUCHI T, NAKAGAWA N, SAYED ET, BARAKAT NAM. **Elimination of toxic products formation in vapor-feed passive DMFC operated by absolute methanol using air cathode filter.** Chemical Engineering Journal. 2014.

ACEA. **Fuel types of new trucks: diesel 95.8%, electric 0.5%, alternative fuels 3.6% share full-year 2021.** Disponível em: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2020/03/158750.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2022.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **Alternative Fueling Station Locator.** Disponível em: <https://afdc.energy.gov/stations/#/find/nearest>. Acesso em: 31 jul. 2022.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **Developing Infrastructure to Charge Electric Vehicles.** Disponível em: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html. Acesso em: 7 set. 2022.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **Fuel Properties Comparison.** Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/fuel_comparison_chart.pdf. Acesso em: 9 ago. 2022.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **Maps and Data-Vehicle Weight Classes and Categories.** Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10380>. Acesso em: 5 fev. 2022.

ANDÚJAR JM, SEGURA F. **Fuel cells: History and updating.** A walk along two centuries. Renewable and sustainable energy reviews. 2009.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **H2@Ports Workshop Summary Report.** 2019. Disponível em: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2020/03/158750.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2022.

BADSHAH, H.; POSADA, F.; MUNCRIEF, R. **Current State of NOx Emissions From In-Use Heavy-Duty Diesel Vehicles in the United States**. International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA. 2019.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama 491/2018, de 19 de novembro de 2015**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Seção 1, p. 155-156. Disponível em: <https://www.mma.gov.br>. Acesso em: 10 jul. 2022.

BRUNETTI, FRANCO. **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. São Paulo: E. Blucher. 2012.

BURKE, A.; SINHA, A.K. **Technology, Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and Buses in 2020–2040**; UC Davis; National Center for Sustainable Transportation: Davis, CA, USA. 2020.

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP. **Cost to refill**. Disponível em: <https://cafcp.org/content/cost-refill>. Acesso em: 18 set. 2022.

CHANDRASEKAR, C.V.; KUMAR, L.A. **A Novel Approach on Range Prediction of a Hydrogen Fuel Cell Electric Truck**. In SAE Technical Paper; SAE International. 2019.

CLARK, N.N.; KERN, J.M.; ATKINSON, C.M.; NINE, R.D. **Factors affecting heavy-duty diesel vehicle emissions**. J. Air Waste Manag. Assoc. 2002.

CURSO MAHLE METAL LEVE: **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. 1. ed. São Paulo: MAHLE Metal Leve S.A., 2019.

DELL, R.M.; MOSELEY, P.T.; RAND, D.A.J. **Development of Road Vehicles with Internal-Combustion Engines**. In Towards Sustainable Road Transport; Academic Press: Oxford, UK; Waltham, MA, USA. 2014.

DRP Nr. 67207: **Arbeitsverfahren und Ausführungsar
Verbrennungskraftmaschinen**. To: R. Diesel as of February 28, 1892.

DULTMEIER. **FUEL TRANSFER PUMP UNIT**. Disponível em:
<https://www.dultmeier.com/blog/agriculture/fuel-transfer-pump-unit/>. Acesso em: 7
set. 2022.

EARL, T.; MATHIEU, L.; CORNELIS, S.; KENNY, S.; AMBEL, C.C.; NIX, J. **Analysis of long haul battery electric trucks in EU**. In Proceedings of the 8th Commercial Vehicle Workshop, Graz, Austria. 2018.

EIA. **Electric Power Monthly**. Disponível em:
https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_5_6_a.
Acesso em: 18 set. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2022**. Disponível em:
www.iea.org/t&c/. Acesso em: 20 set. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2021**. Disponível em: www.iea.org. Acesso em: 19 set. 2022.

ELECTREK. **Tesla is in talks with electric truck customers to install 'Megacharger' stations**. Disponível em: <https://electrek.co/2018/02/02/tesla-semi-electric-truck-customers-megacharger-charging-station/>. Acesso em: 26 jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em 4 jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 9 mai. 2022.

GALLO, J.-B. **Electric Truck & Bus Grid Integration, Opportunities, Challenges & Recommendations**. World Electr. Veh. J. 2016.

GANGLOFF, J.J.; KAST, J.; MORRISON, G.; MARCINKOSKI, J. **Design Space Assessment of Hydrogen Storage Onboard Medium and Heavy Duty Fuel Cell Electric Trucks**. J. Electrochem. Energy Convers. 2017.

GLOBALPETROLPRICES. **USA Diesel prices, 12-Sep-2022**. Disponível em: https://www.globalpetrolprices.com/USA/diesel_prices/. Acesso em: 18 set 2022.

GREIM, H. **Diesel engine emissions: Are they no longer tolerable?** Arch. Toxicol. 2019.

HAMES, Y.; KAYA, K.; BALTACIOGLU, E.; TURKSOY, A. **Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles**. Int. J. Hydrog. Energy. 2018.

HAN, X.; LU, L.; ZHENG, Y.; FENG, X.; LI, Z.; LI, J.; OUYANG, M. **A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle**. ETransportation. 2019.

HUANG, W.D.; ZHANG, Y.H.P. **Energy efficiency analysis: Biomass-to-wheel efficiency related with biofuels production, fuel distribution, and powertrain systems**. PLOS ONE. 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2021**. Disponível em: www.iea.org. Acesso em: 7 jun. 2022.

KALGHATGI, G. **Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?** Appl. Energy. 2018.

KARBOWSKI, D.; DELORME, A.; ROUSSEAU, A. **Modeling the hybridization of a class 8 line-haul truck.** In SAE Technical Paper; SAE International: Warrendalte, PA, USA. 2010.

KAST, J.; VIJAYAGOPAL, R.; GANGLOFF, J.J.; MARCINKOSKI, J. **Clean commercial transportation: Medium and heavy duty fuel cell electric trucks.** Int. J. Hydrog. Energy. 2017.

KIRUBAKARAN; JAIN, A.; NEMA, S., R.K. **The PEM Fuel Cell System with DC / DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation.** Int. J. Recent Trends Eng. 2009.

LIIMATAINEN, H.; VAN VLIET, O.; APLYN, D. **The potential of electric trucks—An international commodity-level analysis.** Appl. Energy. 2019.

LIU, Z. **Overview of heavy-duty diesel engines.** In Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development. Woodhead Publishing: Cambridge, UK; Sawston, UK. 2010.

MACAULEY, N.; WATSON, M.; LAURITZEN, M.; KNIGHTS, S.; WANG, G.G.; KJEANG, E. **Empirical membrane lifetime model for heavy duty fuel cell systems.** J. Power Sources. 2016.

MARTINS, JORGE. **Motores de combustão Interna.** 2. ed. Portugal: Publindústria, 2006.

MEVAWALLA, A.; PANCHAL, S.; TRAN, M.-K.; FOWLER, M.; FRASER, R. **Mathematical Heat Transfer Modeling and Experimental Validation of Lithium-**

Ion Battery Considering: Tab and Surface Temperature, Separator, Electrolyte Resistance, Anode-Cathode Irreversible and Reversible Heat. Batteries. 2020.

MEVAWALLA, A.; PANCHAL, S.; TRAN, M.-K.; FOWLER, M.; FRASER, R. **One dimensional fast computational partial differential model for heat transfer in lithium-ion batteries.** J. Energy Storage, 2021.

MOULTAK, M.; LUTSEY, N.; HALL, D. **Transitioning to Zero-Emission Heavy-Duty Freight Vehicles.** International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA. 2017.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Fast Flow Future for Heavy-Duty Hydrogen Trucks.** Disponível em:
<https://www.nrel.gov/news/program/2022/fast-flow-future-heavy-duty-hydrogen-trucks.html>. Acesso em: 7 set. 2022

O'HAYRE, R.P.; CHA, S.-W.; COLELLA, W.G.; PRINZ, F.B. **Fuel Cell Fundamentals:** John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, USA, 2016.

PELLETIER, S.; JABALI, O.; LAPORTE, G. **Battery Electric Vehicles for Goods Distribution: A Survey of Vehicle Technology, Market Penetration, Incentives and Practices.** Cirrelet: Montreal, QC, Canada, 2014.

RUSSELL, R.L.; JOHNSON, K.; DURBIN, T.; CHEN, P.P.; TOMIC, J.; PARISH, R. **Emissions, Fuel Economy, and Performance of a Class 8 Conventional and Hybrid Truck.** In SAE Technical Paper; SAE International: Warrendalte, PA, USA. 2015.

SASS, F. **Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaus** von 1860–1918. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer. 1962.

SAXENA, S.; LE FLOCH, C.; MACDONALD, J.; MOURA, S. **Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models.** J. Power Sources. 2015.

SCHOETTLE, B.; SIVAK, M.; TUNNELL, M. **A Survey of Fuel Economy and Fuel Usage by Heavy-Duty Truck Fleets.** American Transportation Research Institute: Arlington, VA, USA. 2016.

SHEN, X.; LIU, H.; CHENG, X.; YAN, C.; HUANG, J. **Beyond lithium ion batteries: Higher energy density battery systems based on lithium metal anodes.** Energy Storage Mater. 2018.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. **Emissões Por Setor.** <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>. Acesso em: 4 jul. 2022.

STONE, RICHARD. **Automotive engineering fundamentals** / Richard Stone and Jeffrey K. Ball. 2004.

TANVEER WH, REZK H, NASSEF A, ABDELKAREEM MA, KOLOSZ B, KARUPPASAMY K, ET AL. **Improving fuel cell performance via optimal parameters identification through fuzzy logic based modeling and optimization.** Energy. 2020.

TESLA. **Semi.** Disponível em: <https://www.tesla.com/semi>. Acesso em: 31 jul. 2022.

THE GLOBE AND MAIL. **Whistler's hydrogen buses to be scrapped, replaced by diesel.** Disponível em: <https://www.theglobeandmail.com/news/british-columbia/whistlers-hydrogen-buses-to-be-scrapped-replaced-by-diesel/article15900241/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

TRAN, M.-K.; BHATTI, A.; VROLYK, R.; WONG, D.; PANCHAL, S.; FOWLER, M.; FRASER, R. **A Review of Range Extenders in Battery Electric Vehicles: Current Progress and Future Perspectives.** World Electr. Veh. J. 2021.

TRAN, M.-K.; FOWLER, M. **A Review of Lithium-Ion Battery Fault Diagnostic Algorithms: Current Progress and Future Challenges.** Algorithms. 2020.

VERHELST, Sebastian; WALLNER, Thomas. **Hydrogen-fueled internal combustion engines.** Progress in Energy and Combustion Science, 2019.

WARRENDALTE, PA, USA, 2021.WEN, J.P.; ZHANG, C.W. **Research on modeling and control of regenerative braking for brushless dc machines driven electric vehicles.** Math. Probl. Eng. 2015.

WILBERFORCE T, IJAODOLA O, OGUNGBEMI E, EL HASSAN Z, THOMPSON J, OLABI AG. **Effect of bipolar plate materials on performance of fuel cells.** Reference Module in Materials Science and Materials Engineering: Elsevier Inc. 2018.

YENMAK. **PISTÕES DE ALUMÍNIO.** Disponível em:
<https://www.yenmak.com.tr/pt/produtos/pistes-de-alumnio-439>. Acesso em: 28 jun. 2022.